



Université d'Avignon
et des pays du Vaucluse



Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe



Approche par modélisation pour
améliorer la compréhension du
fonctionnement hydrogéologique
dans la région de la ville de Kaboul
en Afghanistan

Nadège Niard
Master hydrogéologie et environnement

Maître de stage Thomas Himmelsbach
Section B1.17 Protection et qualité des eaux souterraines
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2
30655 HANOVER - GERMANY



Septembre 2005

Remerciements

Je remercie Thomas Himmelsbach de m'avoir proposé ce stage et de m'avoir accordé sa confiance pour la réalisation de cette étude.

Je remercie de son accueil toute l'équipe B1.17 du BGR de Hanovre et particulièrement Rüdiger Ludwig, Georg Houben et Torsten Krekeler pour leur coopération en tant que participant au projet en Afghanistan, Mariola Kosenko, Claudia Henke et Ulrich Gersdorf pour leur soutien et leur aide pendant ce stage.

Je tiens également à remercier Otto Rüber, Martin Becker et Christoph Borgolte du bureau d'ingénierie Delta-h de Dortmund pour leur aide précieuse concernant le logiciel de modélisation SPRING.

Enfin je voudrais remercier Didier Vanden Berghe de l'ONG DACAAR qui fut notre contact à Kaboul ces derniers mois, pour son aide et ses conseils.

Résumé

Dans le cadre du projet « Amélioration de la protection des eaux souterraines pour prévenir et faire face aux problèmes de sécheresse dans la région de Kaboul en Afghanistan » commissionné en 2003 par le ministère allemand des affaires étrangères, l'institut fédérale des géosciences et des ressources naturelles (BGR) de Hanovre mène en collaboration avec le gouvernement afghan des études et investigations de terrain pour améliorer les connaissances concernant l'hydrogéologie dans la région de la ville de Kaboul.

Ces travaux qui concernent aussi bien l'aspect quantitatif que qualitatif des ressources en eaux dans la zone doivent constituer une base d'informations disponible pour l'aide à la décision des futures mesures qui seront prises dans les domaines du développement économique et de l'aménagement du territoire, de l'exploitation et de la protection des ressources et de la gestion des risques naturels.

L'aspect qualitatif a été mis en évidence grâce à une campagne de terrain lors de laquelle des échantillons ont été prélevés dans des puits en zone urbaine et analysés au laboratoire du BGR à Hanovre. Ceci a permis la caractérisation et l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à Kaboul. En revanche en ce qui concerne l'aspect quantitatif, seules des données issues d'investigations menées dans les années 60 à 80 sont disponibles.

L'objet de la présente étude est d'exploiter ces données en les confrontant afin d'établir un modèle conceptuel représentatif du bilan hydrologique dans la région de Kaboul. Dans le même temps la création d'un modèle numérique en deux dimensions constituant une représentation largement simplifiée du système aquifère permettra de visualiser les écoulements dans une zone d'étude définie. Si elle ne représente qu'une première étape dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique dans la région de Kaboul cette étude permet néanmoins de faire de premières estimations concernant la recharge annuelle des eaux souterraines et les propriétés hydrodynamiques du réservoir.

Abstract

Within the framework of the project "Improvement of the protection of groundwater to prevent and face drought periods in Kabul in Afghanistan" commissioned in 2003 by the German Foreign Office, the German Geological Survey (BGR) of Hanover in collaboration with the Afghan Government carries out studies and field investigations to improve knowledge about hydrogeology in the area of Kabul.

Quantitative as well as qualitative aspects of groundwater resources in the area are concerned and the results of those studies must constitute information and data bases background available for the decision-making in future projects concerning the economic development and town planning in the area, the exploitation as well as the protection of water resources and the natural risks management.

Qualitative aspect was studied thanks the collection of water samples from shallow wells in the urban area of Kabul which were analyzed in the laboratory of BGR in Hanover. This has allowed characterizing and evaluating the quality of groundwater in the investigated area. With regard to the quantitative aspect, only data resulting from investigations carried out in the Sixties are available.

The aim of the following study is to use these data in order to establish a conceptual model of the hydrological water cycle and functioning in the area of Kabul. In the same time the creation of a two dimensional numerical model as largely simplified representation of the groundwater system in Kabul will makes it possible to visualize groundwater flow in a determined study area. If it is only a first step in the understanding of the hydrodynamic functioning in the area of Kabul, this study permitted nevertheless to make first estimates concerning the annual groundwater recharge and the hydrodynamic properties of the aquifer.

RESUME	2
ABSTRACT	2
TABLE DES FIGURES	5
TABLE DES TABLEAUX.....	6
INTRODUCTION	8
1 BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) 9	9
2 PRESENTATION DU SUJET D'ETUDE.....	10
2.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	10
2.2 LES ACTIONS REALISEES PAR LE BGR	10
2.3 ETUDE CONFIEE	12
2.4 POURSUITE POSSIBLE DU PROJET	12
3 PARTIE THEORIQUE.....	14
3.1 APPROCHE GENERALE	14
3.1.1 ETAT DES LIEUX, ENJEUX ET INTERET DE L'ETUDE	14
3.1.1.1 Présentation de la situation à Kaboul.....	14
3.1.1.2 Que peut apporter l'approche par modélisation ?	17
3.1.2 PRESENTATION DE LA DEMARCHE, ORGANISATION DU TRAVAIL	18
3.2 APPROCHE DETAILLEE	19
3.2.1 PRESENTATION DES OUTILS ET DONNEES UTILISES	19
3.2.1.1 Le principe de la modélisation.....	19
3.2.1.2 Présentation du logiciel SPRING	20
3.2.1.3 Quelles sont les données disponibles qui pourront être utilisées dans le modèle?	21
3.2.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	23
3.2.2.1 Géographie	23
3.2.2.2 Histoire.....	25
3.2.2.3 Géologie.....	25
3.2.2.4 Climat.....	26
3.2.2.5 Hydrologie.....	30
3.2.2.6 Hydrogéologie.....	33
3.2.2.7 Population, activités, besoins en eau.....	39
3.2.3 MODELE CONCEPTUEL	41
3.2.3.1 Modélisation et objectifs.....	41
3.2.3.2 Bilan hydrologique.....	41

4 PARTIE TECHNIQUE.....	60
4. LA CONSTRUCTION DU MODELE	60
4.1.1 L'ARCHITECTURE DU MODELE	60
4.1.1.1 La délimitation de la zone étudiée.....	60
4.1.1.2 Les structures du modèle.....	61
4.1.1.3 Les contours	62
4.1.1.4 Le maillage.....	63
4.1.2 LES PROPRIETES DU MODELE	64
4.1.2.1 Propriétés internes	64
4.1.2.2 Conditions aux limites	64
4.1.3 LIMITES DU MODELE.....	68
4.1.3.1 Contraintes engendrées par la simplification du modèle.....	68
4.1.3.2 Erreurs de conception.....	68
4.2 SIMULATIONS	69
4.2.1 PRINCIPE.....	69
4.2.2 METHODE D'INTERPRETATION DES RESULTATS.....	70
4.2.3 SIMULATIONS EN REGIME PERMANENT : SCENARII ET RESULTATS.....	71
4.2.3.1 Observations en ne considérant que les flux souterrains entrants	71
4.2.3.2 Observations avec les entrées eaux souterraines, pluie efficace et infiltration de versant	72
4.2.3.3 Mêmes simulations avec trois zones distinctes pour l'épaisseur	73
4.2.3.4 Limitation des volumes infiltrés et exfiltrés au niveau des cours d'eau	73
4.2.3.5 Mise en place d'un prélèvement au niveau de l'exutoire pour simuler l'écoulement supposé dans cette zone	74
4.2.3.6 Sans échanges avec les fleuves.....	75
4.2.3.7 Conclusion	77
4.2.4 SIMULATIONS EN REGIME TRANSITOIRE : SCENARII ET RESULTATS.....	77
4.3 BILAN DE L'ETUDE	78
4.3.1 REGARD CRITIQUE SUR L'ETUDE	78
4.3.2 QUELLES SONT LES PRINCIPALES INFORMATIONS NOUVELLES OBTENUES GRACE A L'ETUDE ?	80
4.3.3 EVALUATION DES DONNEES MANQUANTES ET PROPOSITIONS POUR LA SUITE DE L'ETUDE	82
4.3.3.1 A court terme	82
4.3.3.2 A long terme.....	83
4.3.3.3 Le partage et la diffusion de l'information.....	83
CONCLUSION GENERALE.....	85
SIGLES	86
BIBLIOGRAPHIE	87
TABLE DES ANNEXES.....	89

Table des figures

Figure 1: Analyse en continu des paramètres physico-chimiques de l'eau d'un forage à Kaboul (T.Tünnermeier)	11
Figure 2 : Installation d'un limnigraphe sur un forage pour la mesure en continu des variations piézométriques (T.Krekeler)	11
Figure 3 : Carte de localisation, Kaboul, capitale de l'Afghanistan	14
Figure 4 : Décharge sauvage à Kaboul (G.Houben)	15
Figure 5 : Le fleuve Kaboul en Août 2005 (T.Krekeler)	16
Figure 6 : Bassin d'alimentation du fleuve Kaboul	24
Figure 7 : Découpage géologique des bassins dans la zone d'étude	24
Figure 8 : Graphique ombro-thermique pour la région de Kaboul (réf4)	26
Figure 9 : Neige sur les versants des reliefs dans la région de Kaboul (G.Houben)	27
Figure 10 : Nuage de sable sur la ville de Kaboul (G.Houben)	30
Figure11 : Valeurs moyennes mensuelles des débits d'après des mesures effectuées aux niveau des quatre stations de jaugeage	31
Figure 12 : Le fleuve Kaboul en Août 2005 (T.Krekeler)	32
Figure 13 : Carte représentant les principales données disponibles dans la région pour l'étude des aquifères	33
Figure 14 : Coupe géologique réalisée dans la plaine de Kaboul au niveau du village de Bagrami	34
Figure 15 : Coupe géologique réalisée au niveau de la vallée du Kaboul dans le bassin de Darulaman	36
Figure 16 : Coupe géologique réalisée au niveau de la vallée du Paghman dans le bassin de Darulaman	38
Figure 17 : Prévision pour l'évolution de la population à Kaboul	40
Figure 18 : Densification du paysage urbain à Kaboul (T.Krekeler)	42
Figure 19 : Retenue d'eau en amont du Kaboul (T.Krekeler)	42
Figure 20 : Photo satellite prise au niveau du village de Bagrami, GoogleEarth	50
Figure 21 : Vallée du Paghman en Août 2005 (T.Krekeler)	50

Figure 22 : Modèle conceptuel	53
Figure 23 : Mesure de la profondeur du niveau piézométrique d'un ouvrage situé au Nord-Ouest de la plaine de Kaboul	59
Figure 24 : Délimitation de la zone d'étude modélisée	61
Figure 25 : Les différentes étapes de la réalisation du modèle numérique	63
Figure 26 : Interpolation des niveaux topographiques du lit des cours d'eau à partir de données ponctuelles	66
Figure 27: Echange entre les eaux souterraines et les eaux de surface	67
Figure 28 : Surface piézométrique obtenue en ne considérant que les flux souterrains entrants dans la zone d'étude, $K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $e_{moy} = 40$ m	71
Figure 29 : Zones d'infiltration en noir et d'exfiltration des eaux souterraines en rouge	72
Figure 30 : Surface piézométrique obtenue en considérant 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces et $1 \cdot 10^6$ m ³ /mois d'eaux de fonte, $K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $e_{moy} = 40$ m	73
Figure 31 : Surface piézométrique obtenue en considérant un prélèvement à l'exutoire, 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces et $1 \cdot 10^6$ m ³ /mois d'eaux de fonte, $K_{moy} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s	75
Figure 32 : Surface piézométrique obtenue en considérant les échanges nuls avec les cours d'eau, 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces, $K_{moy} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s	76
Figure 33 : Le fleuve Kaboul dans le centre de la capitale (T.Krekeler)	79

Page de couverture**Photographies en haut et en bas à gauche (T.Krekeler)****Photographie en bas à droite (D.Vanden Berghe)****Table des tableaux**

Tableau 1: Indice de drainage de Hénin-Aubert pour la région de Kaboul en fonction du type de sol.....	29
Tableau 2: Caractéristiques des aquifères dans la région de Kaboul.....	39
Tableau 3: Caractéristiques des aquifères pour le calcul de l'écoulement moyen....	44
Tableau 4: Ecoulements souterrains moyens dans les années 60-70.....	45
Tableau 5: Ecoulements souterrains moyens dans les années 2000.....	45

Tableau 6: Recharge des eaux souterraines par les pluies suivant différentes hypothèses	46
Tableau 7: Débits moyens enregistrés en amont des cours d'eau et volumes d'eau associés.....	46
Tableau 8: Infiltration moyenne possible au niveau des portions de cours d'eau étudiés	47
Tableau 9: Volumes d'eaux disponibles pour l'infiltration pour chaque portion de cours d'eau.....	48
Tableau 10: Estimation des besoins en eau pour l'usage quotidien exprimés en millions de mètres cubes par an.....	49
Tableau 11: Comparaison des débits moyens annuels en amont et en aval du bassin	51
Tableau 12: Débits moyens enregistrés en aval du bassin et volume d'eau associé	51
Tableau 13: Variation de stock en millions de mètres cube en fonction des variations piézométriques et de différentes valeurs de porosité efficace.	52
Tableau 14: Comparaison des écoulements en amont et aval du réseau hydrographique dans la zone d'étude à partir des débits moyens mensuels	55
Tableau 15: Evaluation de la réserve totale en fonction de différentes valeurs de porosité efficace et d'épaisseurs.	56
Tableau 16: Taux de renouvellement en % en fonction de différentes valeurs de réserve totale et d'alimentation.....	56
Tableau 17: Durée de renouvellement en années en fonction de différentes valeurs de réserve totale et d'alimentation.....	57
Tableau 18: Nombre d'années nécessaires pour entraîner des baisses de 7 et 10 mètres du niveau piézométrique en fonction de l'augmentation des besoins en eau de la population.....	57
Tableau 19: Nombre d'années nécessaires pour entraîner des baisses de 7 et 10 mètres du niveau piézométrique en fonction de l'augmentation des besoins en eau de la population.....	58
Tableau 20: Variation de stock en million de mètres cube en fonction des variations piézométrique et de la porosité efficace.	58

Introduction

La région de Kaboul a été étudiée par les scientifiques dans les années 1960 à 1979. A partir des années 1980 et jusqu'en 2001 aucune étude scientifique, ni enregistrement de données n'a pu être correctement mené à cause d'une période de conflits.

Depuis 2001, le pays se reconstruit peu à peu et du matériel peut être mis en place pour recommencer les études. La situation à Kaboul implique un besoin rapide de connaissances concernant la ressource en eau exploitable. En effet il faut pouvoir répondre aux besoins des habitants de cette région, en particulier il s'agit de fournir de l'eau potable pour la consommation humaine et de fournir les quantités d'eaux nécessaires au maintien et au développement économique de la région. L'exploitation des eaux souterraines s'effectue actuellement sans aucune limitation soit sans connaître la vulnérabilité du système aquifère. Les observations et études récentes montrent des problèmes de contamination des eaux de surface par les eaux usées de la ville et une baisse des niveaux piézométriques anormale traduisant une surexploitation de la réserve. Pour pouvoir exploiter durablement les eaux souterraines dans la région, le fonctionnement du système aquifère à Kaboul et plus généralement toutes les ressources en eau existantes et utilisables par l'homme dans cette région. Doivent être identifiées, étudiés et caractérisés.

En attendant d'obtenir des données actuelles il faut travailler avec celles des études passées, bien que celles-ci soient peu nombreuses et de qualité difficilement vérifiable.

La présente étude a été menée au cours d'un stage de six mois au BGR (Institut fédéral pour les Géosciences et les Ressources Naturelles) à Hanovre, dans le cadre de la validation du diplôme de master « Hydrogéologie et Environnement » de l'université d'Avignon. Elle avait pour but la réalisation d'un modèle conceptuel et d'un modèle numérique permettant de caractériser le fonctionnement du système aquifère au niveau d'une zone d'étude définie dans la région de Kaboul. Elle permet surtout de faire un première synthèse et analyse à partir des informations disponibles et de faire de premières estimations quantitatives des composantes du bilan hydrologique. Elle offre également la possibilité de s'interroger sur les données manquantes et nécessaires à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique dans la zone.

Après avoir présenté l'organisme d'accueil et le projet dans lequel s'intègre cette étude, une approche générale nous permettra d'en saisir les enjeux, les objectifs et de préciser la démarche adoptée pour la réalisation du travail demandé. Dans un premier temps, une description détaillée de la zone d'étude présentera les principales données disponibles. Dans un deuxième temps celles-ci seront traitées et utilisées pour établir un bilan hydrologique quantifié. Dans une dernière partie, la construction du modèle numérique sera expliquée et les résultats des premières simulations effectuées analysés.

1 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Le BGR (Institut fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles) est un organisme public sous tutelle du ministère allemand de l'économie et du travail (BMWA), et est considéré comme l'institution scientifique et technologique de référence pour conseiller le gouvernement fédéral dans le domaine des géosciences (1).

En particulier le BGR conseil les ministères de l'économie et du travail ; de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire (BMU) ; des transports, de la construction et du logement (BMV), de la coopération économique et du développement (BMZ) ; le ministère des affaires étrangères (AA) ; ainsi que l'Union Européenne pour les questions concernant :

- l'économie et l'usage des matières premières ;
- les géosciences appliquées ;
- la protection des ressources naturelles et de l'environnement.

Situé à Hanovre, capitale du Länder de la Basse Saxe en Allemagne, le BGR emploie 715 salariés qui se répartissent dans différentes équipes s'intéressant aux domaines suivants :

- L'énergie et les matières premières minérales ;
- La géotechnique ;
- Les risques géologiques ;
- La surveillance sismique et nucléaire ;
- L'étude des mers et des régions polaires ;
- La protection des ressources naturelles (sols, eaux souterraines) et de l'environnement.

L'activité du BGR se répartie entre le conseil, la recherche-développement et la coopération internationale avec les pays en développement. Le domaine des eaux souterraines concerne quatre sections :

- Exploration et méthodes d'exploitation des eaux souterraines (B1.15) ;
- Ressources et dynamiques des eaux souterraines (B1.16) ;
- Qualité et protection des eaux souterraines (B1.17) ;
- Systèmes d'informations hydrogéologiques (B1.18).

Celles-ci interviennent au niveau d'études nationales et internationales concernant les investigations, l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau et leur protection, la géothermie.

La section B1.17 au sein de laquelle s'est effectué ce stage, est composée d'une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs et de chercheurs : 5 géologues, un hydrologue, un cartographe, un ingénieur hydraulique, un chimiste, une informaticienne. L'équipe mène des projets au niveau national notamment en ce qui concerne les études de risques pour les projets d'enfouissement de déchets radioactifs. Elle travaille également au niveau international dans le cadre de la coopération avec les pays en développement.

Actuellement l'équipe mène des projets nationaux tels que la caractérisation et la cartographie de la qualité des eaux souterraines, une étude sur le stockage souterrain de CO₂; et des projets internationaux en Afghanistan, au Bangladesh, en Iran, au Yémen au Malawi, en Zambie et en Syrie. La recherche en chimie porte sur de nouveaux moyens de dépollution des sols et des nappes. Thomas Himmelsbach, directeur de la section fut le maître de ce stage pendant ces 6 mois.

(1) <http://www.bgr.de>

2 Présentation du sujet d'étude

Dans le cadre de ce stage deux études ont été proposées. L'une porte sur une modélisation au niveau du bassin géologique de Kaboul en Afghanistan et devait être considérée comme l'étude majeure. Une deuxième étude, dans le cadre d'un projet de recherche (partenariat BGR-Université d'Hanovre) sur les risques liés au stockage souterrain de déchets radioactifs, consistait à suivre le déroulement d'expériences faisant intervenir des processus d'ultra filtration. Par la suite la possibilité de réaliser et d'interpréter l'une de ces expériences était envisagée.

Les expériences n'ayant pas commencé, la totalité du stage a été consacrée à l'étude sur Kaboul.

2.1 Contexte et objectifs

Le BGR travaille depuis 2003 sur le projet intitulé « Amélioration de la protection des eaux souterraines pour prévenir et faire face aux problèmes de sécheresse dans le bassin de Kaboul en Afghanistan ». Commissionnée et financée par le ministère allemand des affaires étrangères (AA).

Le problème posé, étant donné la situation dans la région de Kaboul (cf figure 3) est de savoir quelle est la ressource renouvelable et exploitable pour approvisionner la population en eau potable et permettre le développement agricole et industriel. Des mesures doivent être prises rapidement pour faire face à une situation d'urgence de plus en plus critique en ce qui concerne la protection de la population et de la ressource en eau et pour répondre aux besoins les plus élémentaires (cf § 3.1.1.1). Ceci implique donc une bonne connaissance du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique. Globalement les scientifiques bénéficient de peu de données pour caractériser précisément la géologie, la climatologie et l'hydrogéologie dans la région de Kaboul. L'hydrogéologie a été étudiée pendant les années 60 et 70, cependant, beaucoup de données ont été perdues ou détruites en Afghanistan suite aux longues périodes de conflits entre 1979 et 2001 (cf § 3.2.2.2). Les enregistrements de mesures se sont arrêtés et il existe peu voire aucune donnée pendant cette période. Dans la présente étude, des données datant principalement des années 60 à 80, disponibles dans les archives du BGR ont été utilisées (cf § 3.2.1). Divers organismes comme l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), l'USGS (United States Geological Survey), DACAAR (Danish Committee for Aid to Afghan-Refugees), le BGR et bien d'autres mènent également depuis 2002 des campagnes de terrain pour reconstituer les connaissances et obtenir de nouvelles données. Des bases de données sont mises en place pour rassembler et diffuser les résultats de ces campagnes.

2.2 Les actions réalisées par le BGR

Les études menées dans la zone permettent de mieux comprendre les phénomènes qui doivent être pris en compte pour une meilleure gestion de la ressource.

L'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques d'échantillons d'eau prélevés dans des puits situés en zone urbaine a permis de caractériser les différents types d'eau rencontrés dans la zone et d'évaluer la qualité de l'eau de consommation. (cf figure 1)

En Juillet 2005 l'ensemble des résultats des études a été restitué sous la forme de deux rapports. Le premier est axé sur les caractéristiques géologique, climatique et hydrologique ainsi que sur les propriétés hydrodynamiques des aquifères dans la région de

Kaboul (2). Le deuxième est consacré à l'étude des caractéristiques physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines au niveau de la ville de Kaboul (3).



Figure 1: Analyse en continu des paramètres physico-chimiques de l'eau d'un forage à Kaboul (T. Tünnermeier)

L'un des objectifs principaux du projet était le transfert de connaissances scientifiques et techniques. En effet, les actions à mettre en place au niveau local et la politique de gestion à court terme et surtout à long terme doivent être pris en charge par les autorités afghanes. C'est pourquoi la coopération avec les scientifiques et divers acteurs locaux a tenu une place importante au sein du projet (cf figure 2). Des cycles de formations ont été proposés aux scientifiques afghans en particulier pour présenter les nouvelles méthodes et techniques de :

- prospection de terrain et analyses chimique ;
- réalisation de puits ;
- utilisation et gestion durable de la ressource.

Des équipements de mesures et d'analyses ont été transférés aux scientifiques à Kaboul.



Figure 2 : Installation d'un limnigraphe sur un forage pour la mesure en continu des variations piézométriques (T. Krekeler)

(2) http://www.bgr.de/b1hydro/fachbeitraege/c200501/kabul_basin_part_I.pdf

(3) http://www.bgr.de/b1hydro/fachbeitraege/c200501/kabul_basin_part_II.pdf

Enfin, pour clore le projet, une conférence intitulée « coopération entre l'Allemagne et l'Afghanistan dans le secteur de l'eau » a été organisée à Kaboul les 2 et 3 Août par le BGR, la GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), le DED (Deutscher Entwicklungsdienst) et la KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau). Les principaux acteurs réunis (une centaine de personnes) étaient des représentants des deux gouvernements ; des scientifiques et d'autres consultants (Université de Kaboul et Université Polytechnique de Kaboul, BGR, GTZ, DED) ; les responsables de l'alimentation en eau en Afghanistan CAWSS (Central Authority for Water Supply and Sewerage) ; ainsi que diverses organisations de la coopération internationale et ONG (CARE (organisation humanitaire), DACAAR, USAID (United States Agency for International Development), USGS, BGS (British Geological Survey)). Les principaux thèmes abordés étaient l'approche et la gestion de l'eau au niveau du bassin versant, la présentation des connaissances sur les eaux souterraines dans la zone ainsi que les moyens protection de cette ressource (aspects quantitatif et qualitatif), l'évaluation de la demande et de la ressource en eau et la gestion des risques (cf annexe 1).

2.3 Etude confiée

Même si de plus en plus d'informations sont disponibles dans la région grâce aux travaux de différentes organisations, les données sont globalement peu nombreuses, difficiles à obtenir et leur qualité est parfois douteuse et difficilement vérifiable (localisation des puits, mesures de débits, qualité des analyses chimiques).

C'est dans ce cadre que m'a été confié la réalisation de la partie modélisation du projet. L'objectif est de rassembler les données existantes et de les exploiter en les confrontant pour générer de nouvelles informations. En outre, il s'agit d'établir un modèle conceptuel pour mieux comprendre le bilan hydrologique dans la zone d'étude, et de réaliser un modèle numérique susceptible de fournir des informations sur le comportement hydrodynamique des eaux souterraines.

Même s'il ne s'agit que de premières estimations basées sur peu de données, celles-ci permettent cependant de réaliser une première étape dans la compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude.

Une telle approche permet également d'établir un bilan des connaissances, d'identifier les données manquantes et donc d'orienter et de préparer les prochaines campagnes de collecte d'informations. Des estimations du volume pouvant être prélevé sans épuiser la ressource seraient à terme les résultats attendus d'une telle approche par modélisation.

2.4 Poursuite possible du projet

Le projet actuel arrivant à son terme, le BGR souhaite continuer ses études et ses actions en Afghanistan et espère obtenir des financements pour un nouveau projet. Il s'agirait entre autre de continuer et d'approfondir le travail de modélisation. Un autre volet important du projet serait la mise en place d'un laboratoire de chimie à Kaboul et la continuation des cycles de formations pour les scientifiques afghans. Ceci doit à terme faciliter la prise en main par les acteurs locaux de l'étude et de la gestion de la ressource en eau dans la région.

Kaboul



3 Partie théorique

3.1 Approche générale

3.1.1 Etat des lieux, enjeux et intérêt de l'étude

3.1.1.1 Présentation de la situation à Kaboul



Figure 3 : Carte de localisation, Kaboul, capitale de l'Afghanistan

Le pays a connu des périodes de guerres et de crises entre 1979 et 2001 qui l'ont considérablement affaibli (cf § 3.2.2.2). Une importante période de sécheresse ces dernières années n'améliore pas la situation.

La recharge des aquifères faible voire peut-être nulle, accompagnée des prélèvements qui s'intensifient dans la zone au fur et à mesure de l'arrivée de nouveaux réfugiés, ont entraîné une baisse du niveau piézométrique d'environ 6-8 mètres et pouvant aller jusqu'à 20 mètres dans certaines zones. Beaucoup d'ouvrages de captage comme les puits creusés à la main et les systèmes de karez sont endommagés (cf annexe 2). Un bon nombre de ces ouvrages sont ou étaient à sec et les puits ont dû être approfondis, par exemple 85% des puits de l'ONG DACAAR étaient à sec à Kaboul en 2002 (réf 14). L'alimentation en eau potable devient de plus en plus difficile pour la population à Kaboul. On estime à environ 40 L.pers⁻¹.j⁻¹ le besoin en eau. Actuellement moins de 20% de la population a accès à un réseau d'alimentation défectueux. Le reste de la population est alimenté par des milliers de pompes manuelles ou motorisées mises en place au niveau de puits peu profonds (réf 1).

Les principaux problèmes rencontrés actuellement sont les suivants :

- Un manque d'équipements en bon état de fonctionnement. Les principaux ouvrages hydrauliques : réseaux de distribution de l'eau potable et d'irrigation ; système de collecte des eaux usées, puits et karezes sont inexistantes ou endommagés. Des réseaux chargés de collecter le surplus d'eau dû à la fonte des neiges et aux fortes pluies de printemps éviteraient les problèmes d'inondations pendant cette période.
- Des besoins importants. Suite à la fin de la guerre, de nombreux réfugiés affluent vers les grandes villes et s'accumulent dans la plaine de Kaboul. La ville comptait 320000 habitants en 1962 (réf 2), les estimations aujourd'hui sont de l'ordre de 3 millions de personnes voire plus, on estime qu'en 2010 la population pourrait atteindre 3,5 millions (cf § 3.2.2.7). De plus le développement économique dans la région va conduire à une augmentation du nombre des industries, en général grandes consommatrices d'eau.

Les deux éléments de contexte précédents contribuent à créer dans la région des conditions de vie précaires. L'absence d'un système efficace de collecte des eaux usées et des déchets entraîne des phénomènes de contamination des eaux souterraines proches de la surface (figures 4 et 5).



Figure 4 : Décharge sauvage à Kaboul (G.Houben)



Figure 5 : Le fleuve Kaboul en Août 2005 (T.Krekeler)

Les analyses chimiques ont révélés des taux élevés de coliformes dans environ 50% des ouvrages de distribution d'eau en zone urbaine (cf annexe 3). Or les eaux peu profondes sont majoritairement utilisées pour la consommation humaine, ce qui facilite le développement des maladies, les enfants étant le plus touchés avec un taux de mortalité atteignant 142‰ en 2002 (4). La sécheresse et les réseaux d'irrigation défectueux entraînent une production agricole qui ne peut subvenir à une population de plus en plus importante. Cette situation à long terme présente des risques de contamination sévère de la ressource en eau superficielle et aquifère peu profond dans les zones urbaines, ainsi qu'un risque de surexploitation des autres ressources disponibles tels que les cours d'eau et les aquifères profonds. En particulier les prélèvements dans des zones plus profondes pourraient constituer des risques de contamination par drainance des aquifères pollués de surface ou encore des risques d'assèchement d'autres ouvrages ou de certains milieux fragiles.

La situation est donc urgente et la gestion de la ressource en eau dans la zone est une des clefs majeures de l'amélioration des conditions de vie et de développement. Les priorités consistent à court terme en la protection des eaux de surface et des sols contre les contaminations, en l'approvisionnement de la population en eau potable de bonne qualité, autrement dit à rétablir et à créer les ouvrages hydrauliques nécessaires à l'utilisation de l'eau. A long terme l'enjeu est de réussir à mettre en place une politique de gestion de la ressource, ayant pour objectifs de se rapprocher d'un équilibre « durable » entre la ressource naturelle disponible et les besoins humains, de prévenir et de gérer les périodes de sécheresse ou d'inondation. Ceci doit se faire grâce à une meilleure connaissance de la région.

D'autres problèmes se posent alors, le manque de données, en particulier de chroniques couvrant de longues périodes d'observation, rend les études scientifiques difficiles. Les acteurs rencontrent également des problèmes d'organisation et de concertation au niveau local, aucune mesure ou plan d'urgence ne sont prévus pour faire face aux problèmes d'inondation et de sécheresse. Globalement la région manque de scientifiques et d'experts compétents (5)

(4) <http://www.populatiodata.net/>

(5) http://portal.unesco.org/fr/ev.php-URL_ID=13582&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

L'amélioration des connaissances et une meilleure gestion de l'eau dans la zone doivent se faire par:

- La mise en place de réseaux de stations de mesure climatique et hydrométrique ;
- L'évaluation des besoins en eaux et une sensibilisation à une utilisation de l'eau évitant le gaspillage. En agriculture notamment il faut établir les besoins des cultures irriguées et mettre en place des méthodes d'irrigation adaptées;
- L'élaboration de bases de données et de documents facilitant la mise en place d'une politique de gestion, tels que SIG (Système d'Information Géographique), cartes thématiques, cartes de risques et documents d'urbanismes. Ces documents doivent s'harmoniser entre eux ;
- L'enseignement dans les universités des nouvelles méthodes d'investigation et de reconnaissance de terrain et méthodes de contrôle et de gestion de la ressource ;
- La révision et la mise à jour de la loi sur l'eau de 81 au niveau législatif.

3.1.1.2 Que peut apporter l'approche par modélisation ?

La zone d'étude est située à Kaboul en Afghanistan, peu de données sont disponibles actuellement pour comprendre le fonctionnement hydrogéologique dans cette zone, de plus de nombreux facteurs ne facilitent pas l'acquisition de nouvelles données. La distance géographique de la zone d'étude, la courte durée des visites sur le terrain (1-2 mois) et le peu d'équipements disponibles sur place ne permettent pas d'obtenir des informations en continu. Beaucoup de zones sont encore minées à la périphérie même de la ville et les déplacements en dehors de la ville sont limités car s'ils ne sont pas toujours interdits ils sont en tout cas risqués.

Une modélisation devrait donc permettre, à partir des quelques données pour l'instant disponibles de générer des informations supplémentaires sur la zone sans investigations de terrain particulières. Il ne s'agit en aucun cas d'obtenir des valeurs exactes pour les différents paramètres et flux étudiés, mais uniquement de donner des ordres de grandeur probables, des fourchettes possibles pour ces valeurs.

Si des études et des rapports rassemblant les données climatologique ou géologique ont été réalisés au BGR, aucune étude n'a réellement confronté toutes ces données pour tenter d'établir un bilan hydrologique global. La réalisation d'un modèle conceptuel comme étape préalable à la réalisation d'un modèle numérique permet d'identifier les composantes et les processus ayant une influence sur le bilan hydrologique de la région. L'adaptation du modèle conceptuel au modèle numérique implique de réfléchir et de proposer des hypothèses quant à la répartition dans l'espace et dans le temps des processus participant au bilan hydrogéologique. Par exemple la création d'une année hydrologique standard est nécessaire pour faire les simulations en régime transitoire (cf annexe 4).

L'intérêt du modèle numérique est qu'il permet de réaliser rapidement un nombre important de simulations différentes en faisant varier les paramètres et/ou les flux associés au modèle. De plus celui-ci peut au fur et à mesure de l'évolution des connaissances dans la zone (nouvelles campagnes d'acquisition de données, ou tout autre information susceptible de vérifier la plus ou moins bonne exactitude des estimations effectuées), être complété, modifié, ce qui permet d'effectuer de nouvelles simulations et d'obtenir très rapidement de nouvelles données.

L'étude dans son ensemble permet de faire un bilan des données utilisables et de déterminer quels types de données il serait intéressant d'obtenir pour améliorer l'étude.

3.1.2 Présentation de la démarche, organisation du travail

Au départ de tout projet ou étude il faut pouvoir définir avec précision la nature du travail demandé et les objectifs de l'étude. Cependant tout au long du projet, les objectifs doivent être rappelés pour éviter les dérives éventuelles voire redéfinis pour s'accorder aux avancées ou problèmes rencontrés.

La modélisation a été effectuée avec le logiciel SPRING (Simulation Prozess in Grundwasser) développé par la société d'ingénierie Delta-h ⁽⁶⁾ et basé sur la méthode des éléments finis. Il fallait donc dans un premier temps apprendre à utiliser ce programme.

Ensuite il fallait identifier et rassembler les données disponibles et évaluer leur valeur et leur utilisation possible pour la modélisation. Dans le même temps il fallait engager une réflexion sur les données nécessaires à la réalisation d'un modèle conceptuel et d'un modèle numérique, ainsi que sur la façon dont les paramètres pourraient être transposés dans un modèle numérique par le logiciel.

A partir des informations connues dans la zone, il fallait réfléchir et formuler plusieurs hypothèses pour concevoir un modèle conceptuel. Il s'agissait de représenter à l'aide de schémas simplifiés les principaux flux, propriétés et paramètres à prendre en compte. Cette étape permet notamment d'apprécier le manque de données nécessaires à la compréhension du fonctionnement du cycle hydrologique et de commencer à percevoir les limites du projet. Elle permet également, à partir des diverses interrogations et hypothèses associées de préparer les différentes simulations qui pourront être effectuées avec le modèle numérique.

Les simulations doivent être réalisées avec organisation et pertinence et les résultats doivent être représentés sous forme de graphiques et cartes claires. Les résultats doivent être interprétés au fur et à mesure des simulations pour réorienter la démarche et proposer de nouvelles simulations.

Enfin le travail effectué et en particulier les principaux résultats de l'étude doivent être restitués de manière synthétique et claire. L'ensemble du travail est donc résumé dans un rapport en français et en anglais, des tableaux synthétiques, des cartes thématiques. Un projet Power Point est réalisé et présenté en allemand à l'ensemble de l'équipe.

(cf annexe 5)

(6) <http://www.delta-h.de/index.htm>

3.2 Approche détaillée

3.2.1 Présentation des outils et données utilisés

3.2.1.1 Le principe de la modélisation

Un modèle peut être simplement défini comme la représentation abstraite d'un système ou processus réel. Le modèle conceptuel est une hypothèse du mode de fonctionnement d'un système ou d'un processus. Cette hypothèse peut être exprimée quantitativement sous la forme d'un modèle mathématique. Les processus sont alors assimilés à des équations, les propriétés physiques à des constantes ou coefficients intervenant dans ces équations et les mesures de l'état du système à des variables. Dans les modèles numériques, l'espace et le temps sont discrétisés et les variables continues sont remplacées par des variables discrètes qui sont définies au niveau de mailles, de nœuds et de pas de temps précis. Les valeurs variables des propriétés internes, conditions aux limites et perturbations du système sont alors approchées par des méthodes numériques pouvant être celle des différences finies ou celle des éléments finis. La valeur d'une variable en une zone du modèle dépend alors des valeurs de celles des zones environnantes. Lors du calcul le modèle procède par méthode itérative ou matricielle pour s'approcher des meilleures solutions possibles aux équations.

Il existe différents types de modèles. On distingue en particulier deux grands ensembles. Les modèles déterministes qui prennent en compte les propriétés conditionnant le fonctionnement du système. Ils utilisent l'équation de Darcy et le principe de conservation de la masse et permettent de simuler les comportements du système étudié. Les modèles globaux, plus connus sous le nom de boîte noire, établissent une fonction entre une variable d'entrée et une variable de sortie et ne prennent pas en compte les propriétés du système. L'hétérogénéité et variabilité des propriétés aquifères sont des caractéristiques existantes de tout système géologique et sont désormais reconnus comme jouant un rôle clef dans les processus d'écoulement d'eaux souterraines. Il est donc bien souvent préférable d'utiliser des modèles déterministes de distribution de paramètres qui permettent une représentation plus réaliste de la distribution spatiale des propriétés du système.

L'objectif d'un modèle est de se rapprocher au mieux de la réalité pour établir des représentations viables de celle-ci et par la suite faire des prévisions sur les évolutions possibles du système. Un modèle doit être calé et testé. Le calage se fait par une comparaison entre les valeurs calculées par le modèle et celles observées dans la réalité. Pour cela il faut disposer de chroniques de données sur de longues périodes et travailler en régime transitoire. Les tests de sensibilité servent à estimer la robustesse du modèle en identifiant les zones et les paramètres sensibles et ainsi donnent un ordre de grandeur de la précision avec laquelle les résultats peuvent être donnés.

3.2.1.2 Présentation du logiciel SPRING

SPRING est un logiciel permettant de créer des modèles déterministes et de simuler les processus d'écoulement et de transport. La méthode numérique utilisée est celle des éléments finis.

Le logiciel présente deux programmes distincts, XSUSI qui permet de créer et de modifier un modèle. La création ou modification de données peut également être effectuée directement à l'aide d'un éditeur de texte relié au programme XSUSI.

XPLT est composé de plusieurs modules de calculs et contrôle des données et d'un module de représentation des résultats des simulations. Ainsi le programme comporte les modules suivants :

- DADIA dont le rôle est de contrôler la viabilité des données et de les préparer aux calculs, les données sont alors archivées sous la forme de données binaires.
- INTERPOL permet de procéder à des interpolations au niveau du maillage en ce qui concerne les attributs affectés aux nœuds ou aux éléments
- EICHEN permet de caler le modèle en ce qui concerne la conductivité hydraulique.
- GEONEU effectue les calculs pour les trajectoires et les écoulements en régime stationnaire.
- INSTAT calcule les trajectoires et les écoulements en régime transitoire.
- SITRA effectue les calculs pour les processus d'écoulement et de transport en régime stationnaire et transitoire, les calculs d'infiltration et permet de travailler suivant l'approche de modélisation inverse.
- XTRA effectue les calculs pour les processus d'écoulement et de transport en régime stationnaire et transitoire en ce qui concerne les radionucléides et les molécules complexes, le couplage avec des processus de transport de chaleur est possible.
- NACHLAUF constitue une interface avec les logiciels ArcView, ArcInfo et permet d'exporter des données et les lignes d'écoulement (dans le cas de modèles 2D).
- PLOGEO est utilisé pour la représentation graphique des données entrantes et sortantes.

Lors des calculs, le détail et la génération de données supplémentaires sont affichés et conservés.

Les modules qui ont été utilisés pour les simulations sont DADIA, SITRA et PLOGEO

Le logiciel SPRING a été conçu de telle sorte que les données introduites dans le modèle, ainsi que le maillage lui-même puissent être modifiés facilement. Le modèle est construit à l'aide de différentes entités pouvant facilement être retravaillées. Les objets peuvent être ponctuels, linéaires ou polygonaux.

On distingue les structures qui sont le plus souvent des polygones ou des polygones et qui servent à structurer l'espace. Elles représentent des zones ou des éléments particuliers comme des zones de recharges, des fleuves, les limites du modèle. Elles sont très utiles en ce qui concerne l'entrée des valeurs des paramètres car elles permettent d'attribuer rapidement une valeur à tous les nœuds constitutifs de la structure ou tous les éléments qu'elle renferme. Les contours permettent un découpage de l'espace en objets linéaires de base et servent à l'élaboration du maillage. Les nœuds sont en effet créés à partir des contours et un générateur d'éléments crée le maillage du modèle en reliant l'ensemble des nœuds entre eux. Les nœuds sont identifiés par un numéro et des coordonnées exactes, les éléments par un numéro et ceux des nœuds qui le constituent.

Les valeurs des paramètres peuvent être intégrées à un modèle à l'aide du programme XSUSI ou directement dans le fichier texte correspondant à l'aide d'un éditeur de texte. Les paramètres sont identifiés par de multiples fonctions telles que POTE pour Potentiel ou MAEC pour l'épaisseur. (cf annexe 21)

Avec SITRA, pour les modèles 2D, la discrétisation dans l'espace se fait à l'aide de fonctions de type linéaires pour les éléments triangulaires et de type bilinéaires pour les quadrilatères. La discrétisation dans le temps pour l'équation d'hydrodynamique souterraine se fait par la méthode d'Euler implicite. Les équations sont résolues par des méthodes itératives.

La représentation des données entrantes et des résultats des simulations peut être visualisée de façon globale par des isolignes, des surfaces colorées ou hachurées, des valeurs ; ou de façon ponctuelle pour des nœuds, éléments ou pas de temps précis préalablement déterminés. Les bilans de masse et le bilan hydrologique globale du modèle figurent dans des fichiers texte générés lors des calculs.

Les cartes obtenues sont constituées de différentes couches auxquelles sont reliés des objets graphiques divers tels que des marqueurs, des couleurs. Le programme XPLT offre la possibilité de retravailler les sorties graphiques du module PLOGEO. On peut superposer des cartes, retravailler des couches, des objets graphiques particuliers, changer les couleurs, les épaisseurs des traits et ajouter du texte. Tous les éléments graphiques peuvent être exportés sous différents formats informatiques (txt, dxf, arc, shp).

3.2.1.3 Quelles sont les données disponibles qui pourront être utilisées dans le modèle?

3.2.1.3.1 Données bibliographiques

La zone a été étudiée pendant les années 60 et 70 par des équipes de scientifiques russe, allemande et française. Beaucoup de données ont été perdues en Afghanistan suite aux différents conflits et périodes de crises subies par le pays entre 1979 et 2001. En particulier les enregistrements de données sur le terrain ont été arrêtés et beaucoup de données ont été détruites sous le régime des Talibans. Cependant quelques rapports disponibles dans la bibliothèque du BGR ont permis de réaliser une étude sommaire des conditions climatique, géologique et hydrogéologique de la zone.

Les experts russes ont menés des investigations en 62 et 63, par forage de nombreux puits, essais de pompage, géophysique par sondage électrique, analyses chimique et bactériologique d'échantillons d'eaux et mise en place de stations de jaugeages sur cours d'eaux et canaux d'irrigation pour étudier les relations nappes-rivières. Les principales zones étudiées sont pour la vallée du Logar celle située entre les villages de Bagrami et Nauvishta (cf annexe 6a), pour le bassin supérieur de Kaboul il s'agit de la zone entre les villages de Gulbackh et Jangalak/Kala-e-Wazir et pour la vallée du Paghman la zone d'étude est située entre la confluence Cheltan-Paghman et l'amont de la confluence avec le Kaboul (cf annexe 6b). Les essais de pompage, réalisés par palier ont été interprétés avec la méthode de Dupuit. Les résultats de ces études de terrain sont rassemblés dans un rapport par Böckh en 1971 (réf 3). Les données utilisées pour cette étude sont les caractéristiques des aquifères dans les zones étudiées. Les propriétés hydrodynamiques sont déterminées grâce à l'interprétation d'essais de pompage réalisés sur des ouvrages le long de profils transversaux. Ceux-ci sont globalement bien répartis sur l'ensemble de chaque section ce qui permet une bonne représentativité pour la section. La structure et la nature des matériaux constitutifs des réservoirs sont représentées par des coupes lithologiques transversales sûrement réalisées à partir des données obtenues lors de la réalisation des forages par interpolation des couches entre les forages et elles ne sont donc peut-être pas représentatives de la réalité (cf § 3.2.2.6). Les études d'infiltration entre deux stations de jaugeages amont-aval ont été utilisées pour estimer des volumes maximums d'infiltration.

Böckh restitue aussi une partie des études menées de 1964 à 1968 par la mission géologique allemande et le « groupe allemand pour l'économie de l'eau ». Les études ont consisté en des inventaires hydrogéologiques, de la cartographie, des forages, l'observation et l'étude du niveau piézométrique et des analyses chimiques d'échantillons d'eau. Entre 65 et 67 une équipe

de géophysiciens a participé aux investigations, en réalisant de nombreux sondages dans les bassins supérieur et inférieur de Kaboul. Ces études ont permis d'élaborer une carte d'identification des formations aquifères et de leurs épaisseurs probables (cf §3.2.2.6).

Dans le rapport de Böckh figurent aussi les études de débits de cours d'eau aux stations Pule Sohka, Tangi Saydan, Sange Nawesta et Tangi Gharu (cf annexe 7). Ces mesures effectuées entre les années 60 et 64 sont issues d'un « livret hydrologique annuel afghan » datant de 67.

Les données climatologiques utilisées sont aussi issues du rapport de Böckh. Il s'agit de l'enregistrement ponctuel dans l'espace et le temps de paramètres tels que la température de l'air, les précipitations pluvieuses et neigeuses, l'humidité de l'air et la vitesse et la direction des vents. Des données récemment trouvées dans un rapport de J.Pias (réf 4) sont seulement utilisées dans cette étude à titre de comparaison.

Des informations provenant de rapports issues des études menées par les hydrogéologues français ont permis de mieux se représenter la zone d'étude et les phénomènes qui la caractérisent, en particulier l'histoire géologique et les phénomènes de précipitations calcaires (réf 4, 5, 6, 7 et 8).

3.2.1.3.2 Données cartographiques et informatiques

Quatre cartes papiers 1/50000 et 1/25000 de 2002 et deux 1/25000 de 1997 sont disponibles au BGR. Sur celles-ci figurent la topographie, les principales routes, rivières et canaux, des noms de lieux, ainsi que des bâtiments ou principaux monuments côtés. D'autres cartes trouvées dans des rapports ou sur Internet ont également permis de situer des localisations particulières (villages, quartiers, montagnes, cours d'eaux...)

Un nombre important de photos ainsi que les discussions avec des personnes ayant été sur le terrain m'ont notamment permis de mieux me représenter la zone d'étude, ce qui facilite la réflexion et la représentation intellectuelle des processus pouvant avoir lieu dans la région.

Récemment nous avons également obtenu de nouvelles données actuelles de mesure de niveaux piézométriques dans des ouvrages géoréférencés par l'intermédiaire de l'USGS (fichiers sous Excel). L'ONG DACAAR nous a également fourni des mesures de coordonnées exactes et d'altitudes précises pour quelques installations du BGR (limnigraphes). Le programme GoogleEarth téléchargeable sur Internet depuis Août 2005 (7), permet d'avoir une vision par image satellite de la région. Différentes couches d'informations peuvent être visualisées et les coordonnées ainsi que les altitudes sont fournies en tout point. Si les données altitudinales non pas directement été utilisées, car elles se sont vérifiées être d'une imprécision de 1 à 10 m par rapport à d'autres données mesurées sur place avec un Trimble GPS, ce programme permet d'avoir une vision directe et réelle de la zone et donc de pouvoir apprécier la topographie, d'identifier les zones irriguées (on distingue très bien les parcelles vertes le long des fleuves en particulier dans les hautes vallées des cours d'eau).

Conclusion

La première étape dans la conception et l'application d'un modèle est de définir la nature du problème et l'objectif du modèle. La détermination d'un modèle et d'un degré de complexité approprié reste subjective et dépend du jugement et de l'expérience de l'analyste, des objectifs de l'étude, et de la qualité des informations initiales disponibles sur le système étudié. Un bon jugement est nécessaire pour évaluer et peser les priorités entre la précision et les coûts, tout en respectant à la fois les exigences du modèle et des données. Dans notre cas et étant donné le peu d'informations disponibles, notre modèle sera au plus simple un modèle 2D horizontal.

(7) <http://earth.google.com/>

3.2.2 Présentation de la zone d'étude

3.2.2.1 Géographie

L'Afghanistan est situé au Sud de l'Asie, sa surface de 653000 km² s'étend entre les latitudes Nord 29 et 38 et les longitudes Est 61 à 75. Le pays présente des frontières avec l'Iran (925 km) et le Pakistan (2412 km) au Sud et le Turkmenistan (744 km), l'Ouzbékistan (137 km), le Tadjikistan (1206 km) et la Chine (96 km) au Nord (cf figure 3).

Le pays est majoritairement montagneux dans le centre et à l'Est. Dans le Nord on trouve les plaines de l'Amu-Daria qui géographiquement se rattachent à la dépression Aralo-Caspienne ; dans cette région semi-aride on peut voir de grandes étendues de steppes comme dans l'Ouest du pays. Dans le Sud et le Sud-Ouest c'est la dépression du Régistan-Séistan-Margo où le paysage désertique d'étendues caillouteuse et dunaire reflète un climat aride.

D'importantes chaînes de montagnes et des systèmes de failles traversent le pays avec des directions principales NE-SO et Est-Ouest. La plus importante chaîne montagneuse est l'Hindu Kush (prolongement de la chaîne Himalayenne). On trouve également une chaîne Est-Ouest dont les monts principaux sont Safed Koh (2262 m) Kohi Baba (5143 m), Feroz Koh (3593 m) et plus au Nord le plateau du Pamir où les sommets atteignent 7000 m (réf 4).

Le pays est parcouru d'un important réseau hydrographique principalement endoréique sauf pour le fleuve Kaboul (cf figure 3). Les principaux fleuves sont : l'Amu-Darya qui forme en grande partie la bordure Nord du pays et se jettera plus au Nord dans la mer fermée d'Aral ; les fleuves Murghab et Hari-Rod qui drainent la partie Nord-Ouest de l'Hindu Kush jusque dans le Sud du Turkmesnistan ; l'Helmand-Rod qui est le fleuve le plus long, draine environ 30% du territoire afghan, avec le Khash-Rod et le Farah-Rod, partent du Sud de l'Hindu Kush, traversent les plaines arides du Sud-Ouest et alimentent les zones marécageuses et lacustres du bassin du Séistan commun avec l'Iran ; enfin, le Kaboul draine environ 9% du territoire et se jette dans les gorges de Jalalabad avant de rejoindre l'Indus au Pakistan. Les cours d'eaux sont en crues en Mars-Avril et sont quasiment à sec pendant les mois d'été.

Situé au Nord-Est du pays, le bassin de Kaboul a une superficie d'environ 1600 km². Il est difficile de nommer la zone d'étude, en effet il est délicat de parler de bassin de Kaboul car on trouve différents découpages dans les études suivant la priorité donnée à la géologie, ou au bassin d'alimentation. Le bassin hydrologique de Kaboul comprend les bassins de Paghman, Logar et Kaboul (cf figure 6).

Notre domaine d'étude ne concerne qu'une petite partie du bassin hydrologique et se concentre sur la ville de Kaboul. Il s'agit d'un bassin géologique composé de deux parties (cf figure 7). On peut parler pour la partie Est de la zone d'étude de la plaine de Kaboul ou du bassin inférieur de Kaboul, son sol présente une pente douce 1,4‰ en moyenne Ouest-Est entre 1800m et 1770 m au dessus du niveau de la mer. Pour la partie Ouest on peut parler de bassin de Paghman-Darulaman ou du bassin supérieur de Kaboul ; il présente une pente plus forte 4,5‰ en moyenne de direction SO-NE variant de 1829 m à 1800 m d'altitude environ. Les sommets bordant la zone d'étude sont de l'ordre de 2250 m au Nord et au Sud-Ouest et jusqu'à 2600 m au Sud-Est.

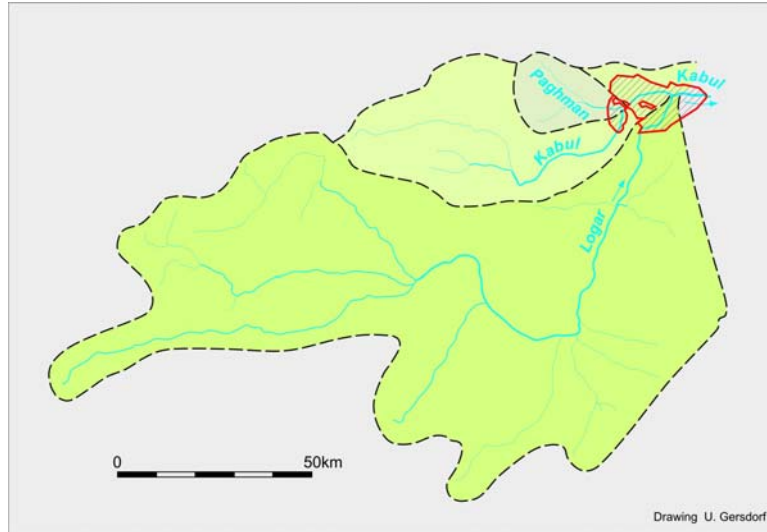


Figure 6 : Bassin d'alimentation du fleuve Kaboul

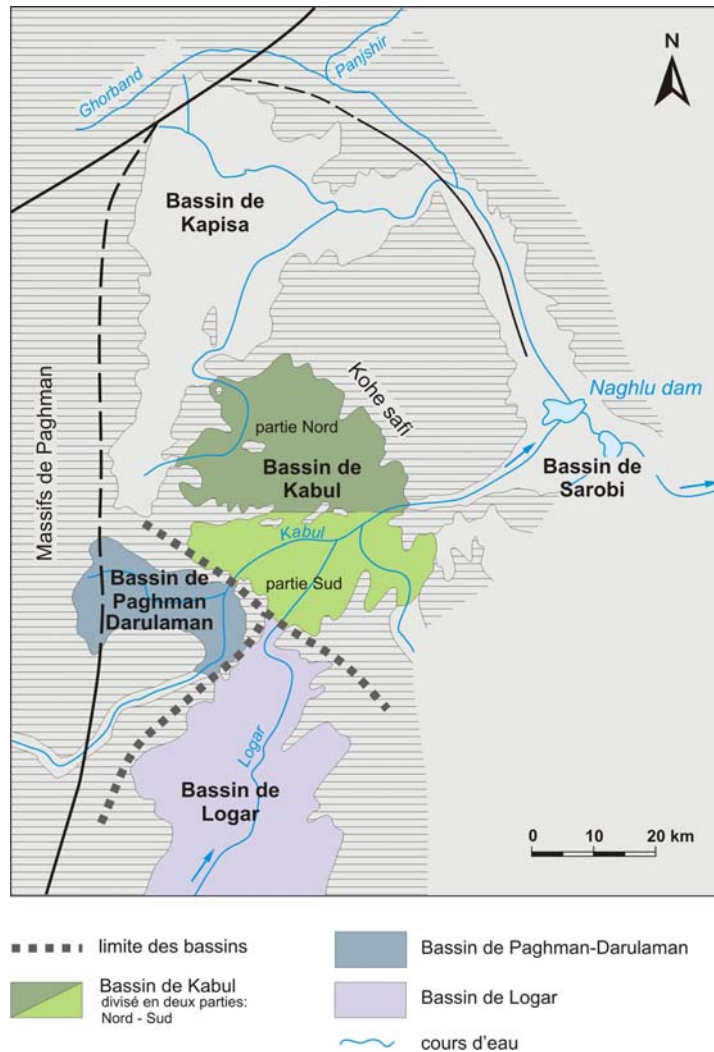


Figure 7 : Découpage géologique des bassins dans la zone d'étude

3.2.2.2 Histoire

Le pays a été envahi de 1979 à 1989 par l'URSS, puis suite à une période de guerres civiles, les Talibans ont pris le pouvoir de force en 1996. Le régime des Talibans est tombé en 2001 après des interventions militaires menées par les pays occidentaux (Etats-Unis en particulier) en réponse aux attentats du 11 Septembre 2001.

Le pays compte environ 28 millions d'habitants qui occupent à 80% les zones rurales. Les périodes de conflits ont cependant causés d'importants déplacements de population. Actuellement la population tend à se concentrer dans les grandes villes, c'est d'une part le retour de réfugiés des pays frontaliers, d'autre part un exode rural important dû à une agriculture difficile et au problème des mines anti-personnelles. Depuis le 13 Avril 2004 le pays a été divisé en 34 provinces et 397 districts.

Les principales ressources du pays sont l'agriculture (blé, maïs, riz) et l'élevage. De nombreux gisements (minerais, pierres de construction, carbonate, gaz naturel) existent mais sont faiblement exploités. L'Afghanistan est également le plus gros producteur de pavot du monde (8).

3.2.2.3 Géologie

Le bassin géologique de Kaboul s'est créé à la fin du Paléocène suite aux mouvements des plaques asiatique et indienne. Principalement constitué de roches métamorphiques il est rempli de sédiments Tertiaire et Quaternaire d'origine continentales et lacustres. (réf 9)

Dans la région de Kaboul les formations précambriennes consistent en deux ensembles concordants. La série de Deh-e Sabz qui comporte des marbres et des quartzites. La série de Kaboul composée de gneiss, quartzites, micaschistes, marbres et pélites épimétamorphiques souvent carbonatées. Ces deux séries sont injectées de diorite. Le primaire n'est représenté que par le Permien supérieur, gréseux puis calcaire, qui constitue la base de la série de Khingil. Cette dernière déposée principalement au secondaire est essentiellement calcaire. Au crétacé terminale on trouve la série de Kotogaé, une couche de schistes, de calcaires et de roches vertes. Au tertiaire les dépôts sont marins au Paléogène (séries schisteuses, flysch, calcaires à nummulites). Au Néogène les dépôts continentaux de sables et de conglomérats forment la série de Lataband. (réf 8)

Les formations remplissant le bassin peuvent être décomposées en plusieurs séries distinctes :

- Les séries molassiques de Butkhak du Miocène supérieur qui sont composées de différents lits de matériaux clastiques. On retrouve principalement des grès rouges, des graviers, des conglomérats et des brèches. Elles peuvent excéder 200 m (réf 3) ;
- Les séries Pliocène de Kaboul de couleur verte se retrouvent dans la partie centrale du bassin et consistent en des lits argileux, des silts lacustres et des lentilles de sables fins. Elles atteignent 200 m (réf 3) ;
- Les séries de Lataband sont des dépôts sédimentaires d'origine continentale datant du Pléistocène moyen et inférieur et constituent les principaux réservoirs aquifères du bassin. Ces dépôts sont pour la plupart indurés par des précipitations calcaires. Elles varient entre quelques mètres à quelques centaines de mètres (réf 3) ;

(8) <http://www.aims.org>

- Les formations les plus récentes sont des dépôts de loess dont l'épaisseur est maximale sur les bords de la plaine. Ces couches ont été remaniées et les plus anciennes s'intercalent avec les graviers de la série de Lataband. Ces formations peuvent atteindre 80m (réf 3). Des marais et des lacs peuvent se former dans des dépressions fermées dans le centre de la plaine (cf annexe 8). L'évaporation importante contribue à la salinisation des sols dans ces zones. Les taux d'évaporation élevés entraînent la formation de croûtes dans les zones d'eaux souterraines peu profondes riches en carbonates et en gypse.

Le phénomène de compaction lié à la subsidence dans le bassin entraîne une cimentation des niveaux inférieurs ; cependant d'autres phénomènes de précipitation chimique de carbonate notamment peuvent entraîner des cimentations (réf 4).

Les fluctuations de température importantes entraînent une altération mécanique/physique rapide des roches dans la région.

La géologie de la zone comporte à l'Ouest la faille de Herat-Bamiyan, à l'Est celle de Sorobi et au Sud-Ouest le système de faille Chaman. Les roches sont fracturées le long de ces failles (réf 9).

3.2.2.4 Climat

La région est soumise à un climat semi-aride continental. Les hivers sont froids et les étés sont chauds (cf figure 8). Les chaînes montagneuses protègent Kaboul des masses d'air froid provenant du Nord, cependant les longues périodes de ciel clair et l'altitude de la région favorisent des températures hivernales en dessous de zéro. A la fin du printemps les pressions subtropicales remontent vers le Nord et couvrent le pays pendant l'été. Sous ses conditions stables le temps est clair, chaud et sec. La position géographique intracontinentale du pays, éloignée des mers et océans, explique de faibles précipitations qui peuvent être très variables suivant les années. Des études ont montré que les précipitations tombaient en premier dans les régions de Kandahar, puis Ganzi et enfin Kaboul. (réf 2)

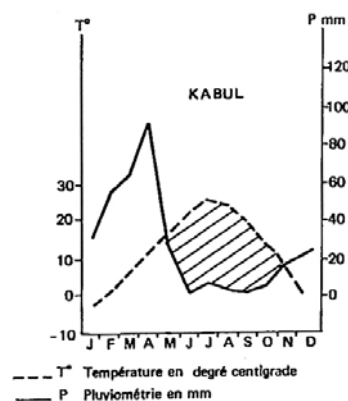


Figure 8 : Graphique ombro-thermique pour la région de Kaboul (réf4)

3.2.2.4.1 Température

Les données disponibles sont les valeurs moyennes mensuelles, mesurées à la station météorologique de l'aéroport de Kaboul (1803 m) et couvrent la période 1957-1977. D'autres valeurs mesurées entre 1959 et 1970 à une station à Kaboul (1791 m, Latitude 34°33N Longitude 69°13E) figurent dans un rapport de Pias.J (réf 4)

La température annuelle moyenne est de 10,8°C (cf annexe 9a). Dans le rapport de Pias, les mesures entre 1959 et 1970 conduisent à une moyenne de 11,8°C. Pour une année standard il fait en moyenne 25°C en été (3 mois) et -3°C en hiver (2 mois) (cf annexe 9b), L'adéquation entre les

températures et la pluie est démontrée, plus la température est basse plus il y a de précipitations (cf annexe 10).

3.2.2.4.2 Précipitations

Les données disponibles mesurées à la station météorologique de l'aéroport de Kaboul (1803 m) sont fournies en mm et couvrent la période 1957-1977 pour les pluies.

Pour la neige des données sont disponibles sous forme de cumuls mensuels en cm pour la période 1958-1971 (réf 3).

La valeur moyenne annuelle est de 330 mm pour la période d'étude, ce qui reflète globalement un climat sec (cf annexe 11). Dans le rapport de Pias, la valeur moyenne annuelle est de 329 mm pour la période 59-70.

L'étude annuelle des pluies montre d'importantes variations suivant les années, on a seulement 155 mm en 1970 et 520 mm en 1959. Ceci met en évidence une alternance de périodes sèches et de périodes qu'on qualifiera de normales. Les périodes sèches sont par exemple les années 58, 66, 69 à 71 et de 73 à 77 (en dessous de 330 mm/an).

L'étude mensuelle (année standard) montre que les valeurs sont de l'ordre de 20 à 80 mm pour les mois d'hiver et de printemps et qu'elles sont inférieures à 3mm pour la période d'été (Juin-Octobre) (cf annexe 12a). Un diagramme de Whisker montre que les variations suivant les années sont celles observées pendant les mois de pluies, la période d'été est donc généralement très sèche dans la plaine de Kaboul (cf annexe 12b). Les mois les plus pluvieux sont Mars et Avril. Les pluies d'été ne surviennent que lorsque le régime de mousson indien s'étend jusque dans la zone.

La neige est une source d'eau essentielle pour la région et devrait donc être prise en compte dans le bilan hydrologique (cf figure 9). Cependant les méthodes de calcul du volume d'eau disponible à partir d'une couche de neige sont peu connues. Il ne serait pas impossible que la neige de la plaine de Kaboul soit soumise à un phénomène de sublimation étant donné les taux d'évaporation élevés dans la zone (cf § 3.2.2.4.3). On remarque aussi que les données fournies sont mesurées en plaine et qu'en altitude la hauteur de neige et donc la ressource en eau disponible est beaucoup plus importante. En effet dans le rapport de Pias des mesures effectuées à des stations situées plus en altitude montre que la couverture neigeuse peut atteindre 60 cm en Janvier et Février à 2183 m et qu'elle atteint environ 400 cm de Février à Avril à 3172 m .



Figure 9 : Neige sur les versants des reliefs dans la région de Kaboul (G.Houben)

Les données concernant la neige ne seront pas directement exploitées, mais on retiendra seulement que pour une année standard les mois les plus neigeux sont Janvier et Février 14,5 cm et 17 cm en moyenne. Il neige en moyenne 15 jours par mois de Novembre à Mars. Les années où les chutes de neige ont été les plus importantes pour la période observée sont 58-59 (cf annexe 13). Les névés permanents ne s'observent qu'à partir de 4000 m (réf 4) et en amont du bassin versant du Kaboul les plus hauts sommets atteignent 4000 m au niveau des montagnes de la chaîne de Paghman. Quant aux fonds de vallées, ils varient entre 2500 m en amont du bassin et 1800 m dans la plaine de Kaboul (réf 3).

Actuellement la région est soumise a une importante sécheresse, les précipitations enregistrées depuis 6 ans sont faibles.

3.2.2.4.3 Evaporation et évapo-transpiration

L'humidité de l'air a été mesurée mensuellement de 1959 à 1964 à la station de Karizimir située à 1860 m d'altitude au Nord de l'aéroport de Kaboul et entre 1959 et 1970 à Kaboul. Les valeurs moyennes annuelles figurant dans les rapports sont respectivement de 54% (réf 3) et de 55% (réf 4). Les mois les plus sec sont ceux d'été présentant les plus hautes températures. Le calcul théorique de l'évaporation potentielle considère l'évaporation maximale possible d'une surface en eau ou d'un sol saturé en eau en fonction du pouvoir évaporant de l'air. Ce paramètre ne prend donc pas en compte les caractéristiques de la surface évaporante. Dans le rapport de Böckh l'évaporation potentielle annuelle moyenne est estimée à 1610 mm à partir des mesures de températures et humidité de l'air (1959-64). En 1956 une valeur annuelle de 1755 mm aurait été mesurée avec un tube Piche (réf 3). Etant donné le peu d'informations disponibles pour expliquer ces valeurs, elles ne seront pas utilisées dans cette étude.

L'évapo-transpiration est calculée à partir des mesures climatologiques et prend aussi en compte les caractéristiques du sol. Des valeurs ont été calculées avec deux méthodes différentes en utilisant la formule d'Ivanov et celle de Turc.

La formule d'Ivanov utilisée permet de calculer l'évapo-transpiration potentielle mensuelle moyenne à partir des moyennes mensuelles de température et d'humidité.

$$ETP_{Ivanov} = 0,0011 * (T+25)^2 * (100-U)$$

Avec :

- T = Température de l'air moyenne mensuelle en °C
- U = Humidité de l'air relative moyenne mensuelle en %
- ETP_{Ivanov} = hauteur evapo-transpirée en un mois en mm

Les données utilisées ne couvrent pas les mêmes périodes, 57-77 pour la température et 59-64 pour l'humidité, cependant les calculs ont été effectué pour la période 57-77, en construisant une année standard à partir des données disponibles. L'étude des données montre qu'il n'y a pas eu de périodes particulières entre 65 et 77. Si l'humidité de l'air n'est pas un paramètre particulièrement variable suivant les années alors cette extrapolation des valeurs d'humidité aux années 65-77 n'est pas trop erronée.

La formule de Turc

Elle permet de calculer l'évapo-transpiration réelle annuelle moyenne à partir des valeurs moyennes annuelles des températures et des précipitations. Cette formule est plus réaliste puisqu'elle prend en compte le volume d'eau disponible pour l'évapo-transpiration.

$$ETR_{Turc} = N / [0,9 + (N/Jt)^2]^{0,5}$$

Avec :

- N = cumul annuel des pluies en mm
- $Jt = 300 + 25 \cdot t + 0,05 \cdot t^3$
- t = température moyenne annuelle en °C

Les calculs d'évapotranspiration sont utiles pour calculer les pluies efficaces.

La comparaison des pluies avec l'évapo-transpiration potentielle calculée à partir de la formule d'Ivanov, montre que le cumul annuel est en moyenne de 116 mm (cf annexe 14a), et que l'infiltration dans le sol d'une partie des précipitations n'est possible qu'entre Décembre et Avril (période possible de recharge du système aquifère par les pluies). Avec la formule de Turc la recharge annuelle possible serait uniquement en moyenne de 27 mm (cf annexe 14b).

Cependant une part de l'eau récoltée dans le pluviomètre peut aussi être de la neige fondue, or la neige tombant dans la plaine, si elle est soumise au phénomène de sublimation constitue une part perdue pour l'infiltration. De plus les phénomènes de ruissellement, d'humidification des sols, d'infiltration dans les sols et de réévaporation dans le sol ne sont pas suffisamment connus pour calculer le volume d'eau réellement susceptible d'arriver dans la zone saturée de l'aquifère, soit l'infiltration efficace.

Les seules données disponibles en ce qui concerne l'état des surfaces des sols dans la zone et leur propriété à l'infiltration sont celles trouvées dans un rapport de Pias (réf 4).

L'indice de drainage de Hénin-Aubert permet de calculer la quantité d'eau théorique D en mm susceptible de s'infiltrer dans un type de sol précis en fonction des valeurs moyennes annuelles de pluviométrie P et de température T :

$$D = \gamma' P^3 / (1 + \gamma' P^2) \quad \text{avec } \gamma' = \alpha \gamma \quad \text{et } \gamma = 1 / (0,15T - 0,13)$$

Avec $\alpha = 1$ pour les limons, 2 pour les sables et 0,5 pour les argiles. Ce qui donne pour la région de Kaboul :

Kaboul	Sol limoneux	Sol sableux	Sol argileux
D en mm	20.5	39.1	10.8

Tableau 1: Indice de drainage de Hénin-Aubert pour la région de Kaboul en fonction du type de sol

3.2.2.4 Vitesses et directions des vents

Les mesures ont été effectuées à la station de Karizimir à 1860 m d'altitude, entre les années 1959 et 1964. Les mesures ne sont peut être donc pas représentatives de la situation dans la plaine de Kaboul (1800 m). L'analyse des données indique que les directions dominantes sont Nord (surtout en Juin, Juillet et Août), Sud (surtout en Décembre, Janvier et Février) et Nord-Ouest (surtout en fin d'été). Toutes directions confondues on remarque que les vitesses des vents sont deux fois plus importantes (en moyenne 12 km/h) pour la période de Janvier à Juin que pour le reste de l'année (5 km/h). (cf annexe 15).

On remarque que le vent du Sud peut apporter des masses d'air en provenance de l'océan Indien, soit des masses d'air chargées d'eau susceptibles de former des précipitations importantes en hiver. Il aurait été intéressant d'avoir les mesures de vent de ces dernières années pour voir si la sécheresse peut être liée à une moins importante présence du vent du Sud.

La sécheresse de ces 6 dernières années a entraîné la disparition de la végétation. Celle-ci a par exemple quasiment disparue dans la région de Dhi Shabs (vallée verte) située au Nord de Kaboul. Les sols sont soumis à l'érosion éolienne et la surface agricole utile est amoindrie. Les résultats de l'érosion se traduisent aussi par les nuages de sables qui (cf figure 10).



Figure 10 : Nuage de sable sur la ville de Kaboul (G.Houben)

3.2.2.5 Hydrologie

La région de Kaboul est parcourue par trois cours d'eaux principaux (cf figure 6). Le Kaboul (cf figure 12) s'écoule d'Ouest en Est et traverse la ville de Kaboul avant de se jeter dans l'Indus. Il draine l'ensemble des bassins de Paghman-Darulaman, Kaboul et du grand bassin de Logar. Le fleuve Paghman se jette dans le fleuve Kaboul à l'Ouest avant l'entrée dans la grande plaine centrale. Le Kaboul est ensuite rejoint par le Logar dans la zone Est de la plaine en bordure de la ville. L'exutoire du bassin est situé à environ 10 km à l'Est de la confluence Kaboul-Logar. Il draine l'ensemble des eaux de surface et des eaux souterraines des bassins de Paghman, Kaboul et Logar, l'impluvium à cet endroit est d'environ 12,890 km².

Les seules données disponibles pour étudier le comportement des eaux de surface sont des mesures de débit des différents cours d'eau effectuées dans quatre stations de jaugeage entre les années 60 et 64 (cf figure 11).

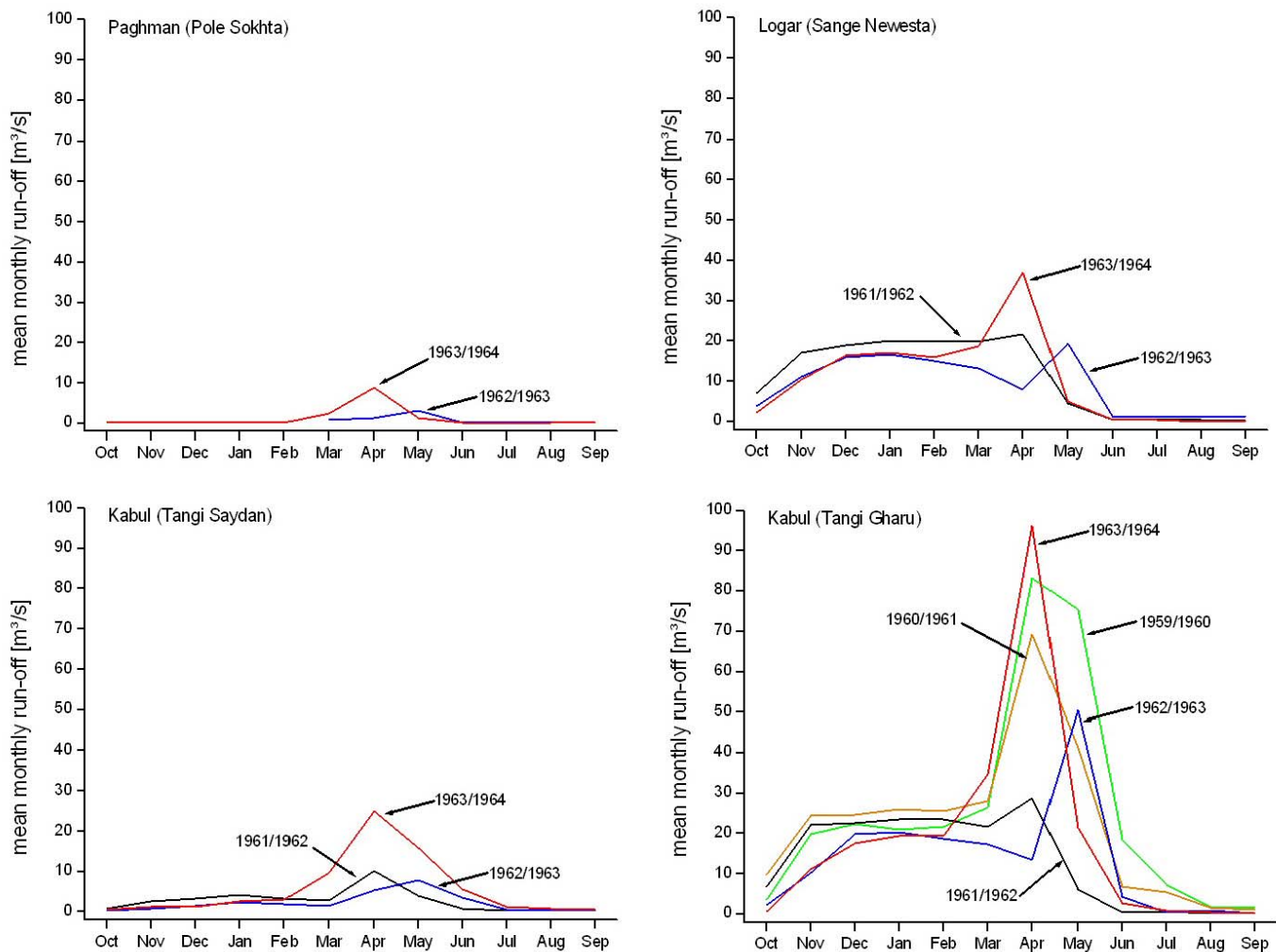


Figure 11 : Valeurs moyennes mensuelles des débits d'après des mesures effectuées aux niveau des quatre stations de jaugeage

Les débits maximums sont enregistrés en Avril pour 1964 et en Mai pour 1963 ; ces mois correspondent aux périodes de fortes pluies et de début de fonte des neiges.

Les cours d'eau Kaboul et Logar sont quasi-permanents, ils tendent à être à sec pendant les mois d'été. Lors des visites de terrains de ces dernières années, les cours d'eau étaient à sec au niveau de certaines portions.

Le lit des fleuves constitués de matériaux perméables permet une réalimentation de l'aquifère par infiltration. Pour estimer la part de la recharge due aux cours d'eau nous pourrions utiliser les études d'infiltration effectuée par les scientifiques russes en 62-63.

3.2.2.5.1 Le Paghman

Seulement deux années 63 et 64 sont disponibles pour ce cours d'eau. Les mesures enregistrées à la station de jaugeage Pule Sokhta montrent un débit très faible, en moyenne 0,9 m³/s. Les débits maximums restent inférieurs à 10 m³/s. Le débit minimum journalier était de 20 L/s en Juillet 1964 (réf 3).

Le réservoir de Karga situé sur le cours du Karga à environ 12 km à l'Ouest de la confluence Paghman-Kaboul, intercepte les surplus d'eaux en provenance du bassin de Paghman au printemps lors de la fonte des neiges et des fortes pluies.

3.2.2.5.2 Le Logar

Son débit est mesuré à la station de jaugeage Sange Nawesta où le cours d'eau draine alors une surface d'environ 10000 km². Le débit mensuel moyen est de 10 m³/s. Le débit maximum observé est de 22 m³/s (Avril 62). Le débit minimum journalier était de 50 L/s en 1964 pendant 79 jours de Juillet à Septembre (réf 3). En comparant les hydrogrammes des quatre stations on voit nettement que la contribution à l'écoulement du Logar est plus importante que celles du Kaboul et du Paghman. Le fleuve contribue à la majeure partie des écoulements d'hiver par exemple. En effet le bassin du Logar présente une grande surface d'impluvium dont la majeure partie est située dans des montagnes à hautes altitudes et où la fonte des neiges peut survenir pendant l'été.

3.2.2.5.3 Le Kaboul

Les débits sont mesurés à Tangi Saydan avant la confluence Paghman-Kaboul, la surface drainée est estimée à 1650 km² et à Tangi Gharu, l'exutoire du bassin. Le débit mensuel moyen pour les années 62 à 64 est de 3,5 m³/s en amont des deux confluences et de 15 m³/s pour Tangi Gharu. Les débits journaliers les plus bas enregistrés sont de 200 L/s pour Tangi Saydan (de 4 à 11 jours) et à Tangi Gharu ils sont de l'ordre de 130 L/s pour 62, 63, 64 (de 2 à 13 jours) et 155 L/s pour 60 et 61 (de 1 à 2 jours). L'exutoire présente les plus forts débits jusqu'à 96 m³/s pour Avril 64. La rivière est présentée comme un drain des eaux de surface et des eaux souterraines dans toute la zone d'étude (réf 3).



Figure 12 : Le fleuve Kaboul en Août 2005 (T.Krekeler)

3.2.2.6 Hydrogéologie

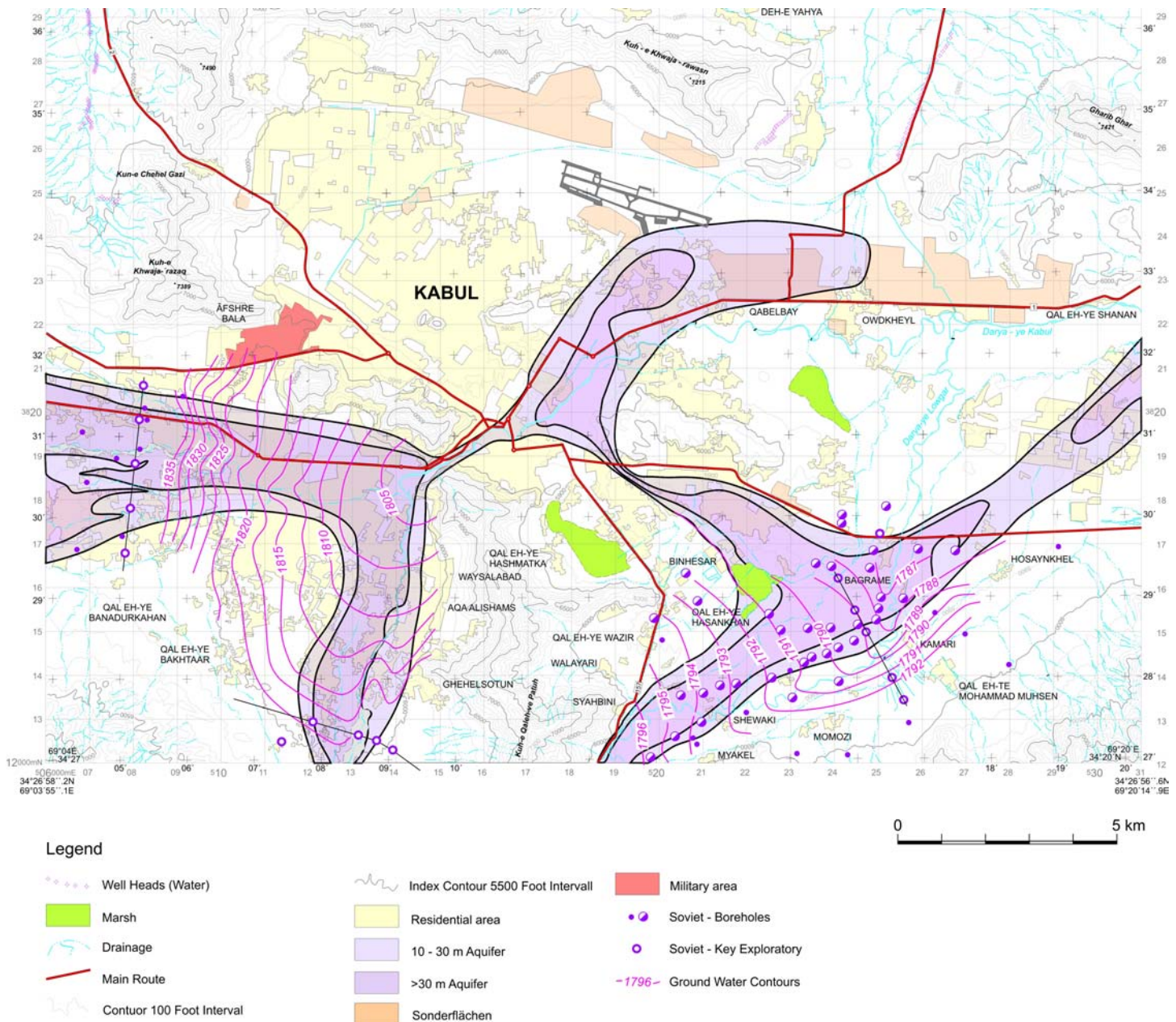


Figure 13 : Carte représentant les principales données disponibles dans la région pour l'étude des aquifères

On peut distinguer quatre corps aquifères principaux dans la zone de Kaboul (cf figure 13). Le bassin de Darulaman comporte deux aquifères qui s'étendent le long du fleuve Paghman et du cours supérieur du fleuve Kaboul. Deux autres aquifères sont localisés dans la plaine de Kaboul au niveau du cours inférieur des deux fleuves Kaboul et Logar. Les aquifères sont recouverts par des lits de limons de l'ordre de quelques mètres et dont la porosité est qualifiée de bonne car ils présentent des macro-pores (réf 3), sauf au niveau des fleuves où les matériaux de surface sont constamment remaniés par les déplacements du lit des cours d'eaux. Les aquifères sont donc généralement qualifiés de libres.

Les épaisseurs peuvent atteindre localement 80 m et les valeurs de perméabilité disponibles varient entre $2,3 \cdot 10^{-5}$ et $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Les niveaux plus profonds affectés par des phénomènes de compaction et indurés par des précipitations calcaires peuvent présenter une porosité réduite (réf 10). Cependant ces niveaux indurés sont aussi fracturés (réf 3). Les zones peu profondes sont exploitées par de nombreux puits creusés à la main, c'est pourquoi ces ouvrages sont majoritairement touchés par la baisse du niveau piézométrique.

Les eaux souterraines s'écoulent globalement de l'Ouest vers l'Est (cf figure 13). Les principales composantes de la recharge des eaux souterraines dans la zone d'étude peuvent être :

- Les apports souterrains ;
- Les infiltrations de versants au niveau des bordures du bassin ;
- L'infiltration des eaux fluviales et des canaux d'irrigation ;
- L'infiltration des eaux domestiques et industrielles
- L'infiltration de la pluies efficace.

En ce qui concerne l'infiltration des eaux domestiques et industrielles, nous n'avons pas d'informations sur les volumes mobilisés et les lieux de prélèvements et de rejets.

Les valeurs caractérisant les propriétés hydrodynamiques des aquifères sont issues de l'interprétation d'essais de pompage réalisés dans des puits d'investigation n'étant pas parfaits, ces valeurs ne sont donc pas représentatives de la totalité des aquifères.

3.2.2.6.1 Aquifère de Logar

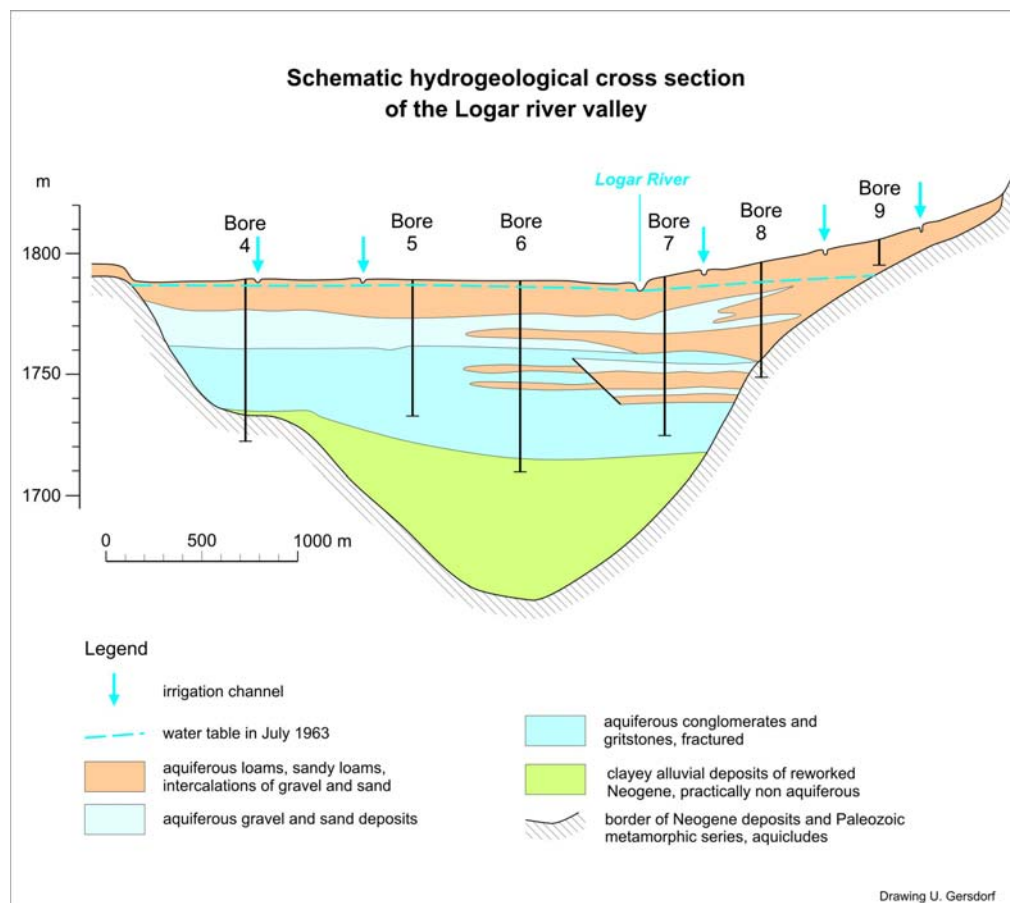


Figure 14 : Coupe géologique réalisée dans la plaine de Kaboul au niveau du village de Bagrami

Localisation, dimensionnement et constitution

Il a une longueur d'environ 19 km et une largeur de 2 km. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 30 à 40 mètres et peut localement atteindre 70 mètres. Sa partie inférieure est constituée de dépôts grossiers principalement des conglomérats et des grès à gros grains cimentés par des sédiments calcaires. Ceux-ci reposent sur des dépôts du Néogène : grès argileux, argiles et matériaux remaniés. Les niveaux supérieurs sont constitués de sables et de graviers. L'ensemble est recouvert par une couche de limons de 10 à 15 m voire plus. Dans la

zone du cours d'eau les limons sont érodés et le lit est constitué de sables et graviers (cf figure 14). Tous les niveaux sont considérés comme hydrauliquement interconnectés et l'aquifère est qualifié de libre. (réf 3)

Propriétés hydrodynamiques

Des essais de pompage ont révélés des valeurs de perméabilité entre $1,4 \cdot 10^{-4}$ et $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s. La perméabilité moyenne calculée à partir des 6 puits est de $5,15 \cdot 10^{-4}$ m/s. Des valeurs de perméabilité sont également données pour la couche de limons, allant de $5,8 \cdot 10^{-5}$ à $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. (réf 3).

Dans une autre étude (réf 11) les niveaux de sables et graviers au Sud de Bagrami ont des transmissivités de l'ordre de $4,1 \cdot 10^{-2}$ à $9 \cdot 10^{-2}$ m²/s, ce qui donne des perméabilités de l'ordre de $8,2 \cdot 10^{-4}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s (avec une épaisseur moyenne de 50 m), soit des valeurs du même ordre que celles trouvées dans le rapport de Böckh. Dans la même étude figurent des coefficients d'emmagasinement allant de $1 \cdot 10^{-2}$ à $1,5 \cdot 10^{-2}$ (réf 11).

Observation piézométrique

Les isopièzes (cf figure 13) représentent l'état de la nappe en Décembre 62 - Janvier 63 et montrent que le niveau piézométrique était à l'époque très proche de la surface. En rive gauche du Logar (dans le sens de l'écoulement) il était entre 1,5 et 2 m et jusqu'à 30 et 80 cm dans les dépressions. Sur la rive droite le niveau se situait plutôt à 5-10 m de profondeur (réf 3). Cela s'explique sûrement par le fait que le niveau du sol est beaucoup plus élevé en rive droite (cf figure 14).

Relation nappe-rivière

En ce qui concerne les relations nappe-rivière dans cette zone les isopièzes montrent que la nappe alimente la rivière en saison d'hiver sauf à la sortie de la vallée très étroite où la rivière semble alimenter la nappe. Une étude des pertes enregistrées entre deux stations de jaugeage Bagrami et Nawesta séparées de 12 km environ (cf annexe 6a), permet d'estimer un taux d'infiltration dans la nappe de 2%.

3.2.2.6.2 Aquifères de Kaboul

On distingue deux aquifères, un situé à l'Ouest dans le bassin de Darulaman avant l'entrée dans la plaine de Kaboul longe la partie supérieure du Kaboul entre la passe de Tangi Saydan et la confluence avec le Paghman ; l'autre est situé à l'Est dans la plaine de Kaboul au niveau du cours d'eau.

3.2.2.6.2.1 Aquifère Ouest

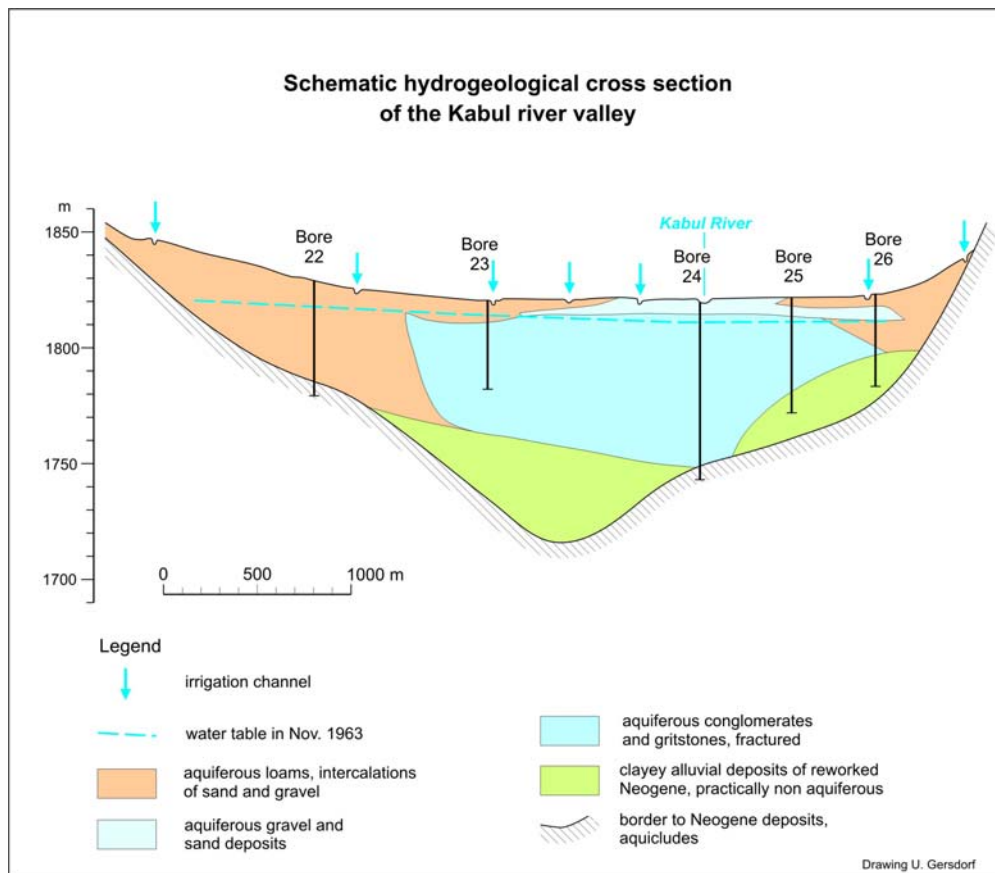


Figure 15 : Coupe géologique réalisée au niveau de la vallée du Kaboul dans le bassin de Darulaman

Localisation, dimensionnement et constitution

L'aquifère situé dans le bassin de Darulaman est constitué de dépôts grossiers car directement déposés à la sortie des massifs. Il s'étend sur environ 9 km de long et 2,5 km de large le long du fleuve Kaboul et son épaisseur varie de 40 à 80 m environ suivant les zones.

L'aquifère est composé de trois horizons (cf figure 15). Il s'agit principalement de conglomérats et de grès d'une épaisseur de l'ordre de 30 à 65 m, dont les parties compactées et cimentées s'accroissent avec la profondeur. Au dessus se trouve une mince couche de sables et graviers allant de 2 à 9 mètres en bordures de vallée et pouvant atteindre 20m au centre. L'ensemble est recouvert par une couche de limons à macropores. Cette dernière couche est plus mince au centre de la vallée (1-5 m) que sur les bords (jusqu'à 15 m) et est inexistante dans l'espace de liberté du fleuve.

Propriétés hydrodynamiques

Les perméabilités disponibles pour les limons varient entre $1,4$ et $6,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, et entre $0,5$ et $7,5 \cdot 10^{-4}$ m/s pour les conglomérats (réf 3). On utilise la valeur des conglomérats car pour la section étudiée ils représentent la majeure partie de la surface, de plus on remarque que la valeur donnée pour les limons est du même ordre de grandeur. On obtient une perméabilité moyenne de $2,76 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Des essais de pompage effectués au cours des années 1963 à 1982 ont révélés des valeurs de transmissivités allant de $1 \cdot 10^{-5}$ à $6,8 \cdot 10^{-2}$ m²/s (réf 11). Cependant dans ce rapport aucune information sur la localisation exacte des puits et l'épaisseur de l'aquifère au niveau des puits n'est fournie, c'est pourquoi ces résultats ne peuvent être utilisés.

Aucune valeur n'est fournie pour le coefficient d'emmagasinement, cependant les études réalisées qualifient l'aquifère de libre.

Relation nappe rivière

Une étude des pertes enregistrées entre deux stations de jaugeages Gulbak et Chekhel-Sutun séparées de 6 km environ (cf annexe 6b), permet d'estimer un taux d'infiltration dans la nappe évalué à 26%. Une étude mensuelle de ces mesures montre que les pertes sont moins importantes pour les mois d'été, or cette période correspond à la période d'irrigation. Ceci laisse à penser que la relation nappe-rivière pour cette période là est inversée et que la nappe alimente la rivière en été (réf 3).

3.2.2.6.2.2 Aquifère Est

L'autre aquifère identifié est situé dans le bassin inférieur de Kaboul au niveau de l'entrée dans la plaine et s'étend presque jusque vers la confluence avec le Logar. Son extension plus à l'Est n'a pas pu être identifiée car les eaux devenant trop riches en sels au niveau de la ville de Ut Khel ne permettaient plus l'application efficace des méthodes électriques de géophysique. Les dimensions de la zone de graviers identifiée sont environ 11 km de long, 2 km de large et de 10 à 30 m d'épaisseur. La partie centrale de 6 km de long et 1 km de large est essentiellement constituée de sables et graviers. L'étude n'a pas permis d'identifier de zones de conglomérats. Des essais de puits ont donnés de très bonne productivité dans la zone 40L/s pour un rabattement de seulement 1m. Cependant l'étude récente des caractéristiques physico-chimiques au niveau de Kaboul montre que les eaux dans cette zone sont contaminées par les eaux usées de la ville (réf 12).

Niveau piézométrique

Il se situe entre 2 et 12 m de profondeur, et les variations saisonnières sont de l'ordre de 2 à 3m. Une carte sur la piézométrie et trois chroniques piézométriques de puits ont été réalisées par la mission géologique allemande au sein de la ville de Kaboul et pour les années 63-64-65 (cf annexe 16). La zone concernée étant assez réduite, les informations de la carte piézométrique ne seront pas utilisées. Les courtes chroniques piézométriques fournies montrent que les variations saisonnières sont en adéquation avec les précipitations et le régime des cours d'eau, ainsi le maximum piézométrique est observé pour les mois Avril-Mai. Le battement de l'ordre de 1 m environ dans cette zone, est plus important dans la zone du fleuve où la piézométrie semble alors directement reliée aux fluctuations du niveau du cours d'eau traduisant une relation nappe-rivière qui confirme la possibilité d'infiltration des eaux du fleuve dans la nappe.

Si le niveau piézométrique était plutôt proche de la surface dans les années 60 (2-3 m) dans la ville de Kaboul, il est actuellement plutôt à environ 7-10 m voir plus suivant les zones. Des mesures précises ont été effectuées sur un puit du BGR dans le centre ville et sont confirmées par le fait que des puits sont à sec dans la ville. Le niveau piézométrique aurait donc baissé d'environ 7 m en 40 ans. On rappelle cependant que depuis les 6 dernières années la région est soumise à une importante sécheresse alors que les besoins en eau de la ville de Kaboul n'ont cessé de croître suite au retour des réfugiés.

3.2.2.6.3 Aquifère de Paghman

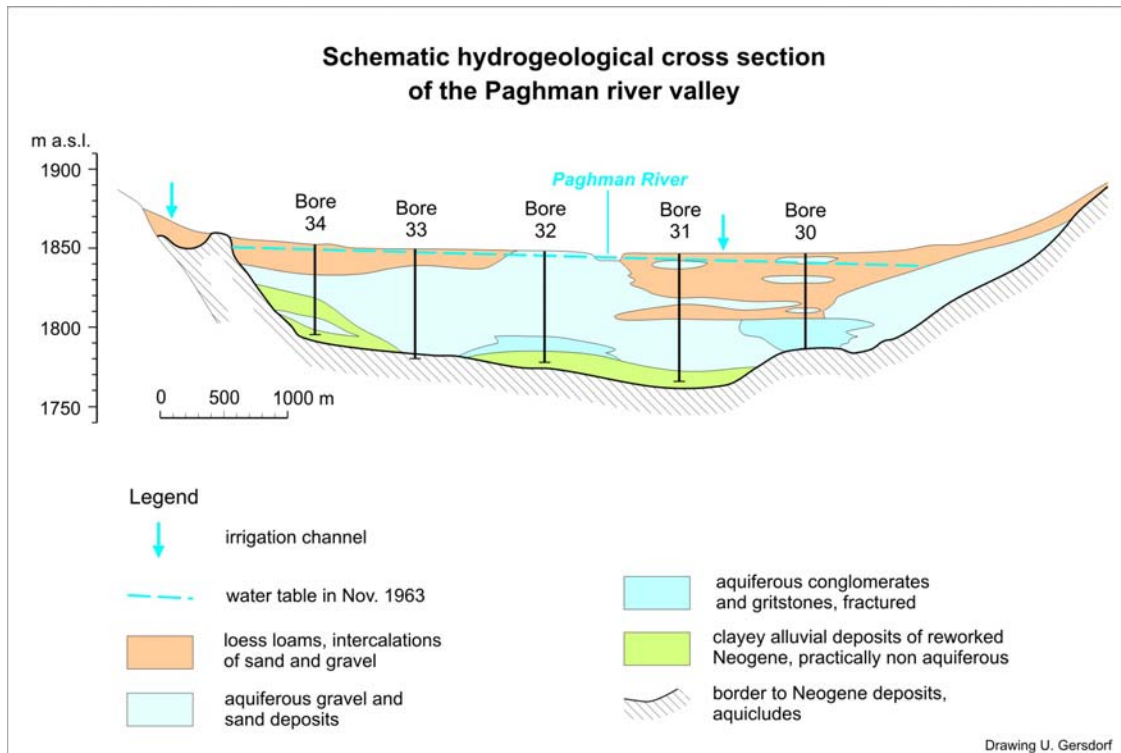


Figure 16 : Coupe géologique réalisée au niveau de la vallée du Paghman dans le bassin de Darulaman

Localisation, dimensionnement et constitution

Il s'étend sur environ 10 km de long et 4 km de large et son épaisseur moyenne est de 45 m et peut atteindre 70 m. Il est principalement constitué de sables et de graviers (cf figure 16). Ces couches sont plus épaisses à l'Ouest où elles affleurent dans certaines zones en surface. Les conglomérats et grès peu épais ne sont présents que dans certaines zones. A l'Est, une épaisse couche de limons perméables recouvre les sables et graviers. L'aquifère est qualifié de libre. (réf 3)

Propriétés hydrodynamiques

Les perméabilités fournies varient de 0,2 à $3 \cdot 10^{-4}$ m/s (réf 3).

Des essais de pompage de 1977, réalisés dans la zone du projet de champ captant Afshar (cf annexe 6b) ont donné des valeurs de transmissivités allant de $1,3 \cdot 10^{-3}$ à $5,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s (réf 13). En utilisant les dimensions de l'aquifère issues du rapport de Böckh (45 m d'épaisseur moyenne) on peut calculer des valeurs de perméabilités de $2,8 \cdot 10^{-5}$ à $1,17 \cdot 10^{-3}$ m/s, ce qui reste donc de l'ordre de grandeur de celles trouvées en 62-63. La zone du projet Afshar ne représentant qu'une petite partie au Nord de l'aquifère, elle ne peut être considérée comme représentative de la totalité du système. Cette dernière étude classe l'aquifère comme semi-captif dans cette zone.

Niveau piézométrique et relations nappe-rivière

Le niveau est moins profond au centre de la vallée que sur les bords. Il était à -19 m dans les années 62/63 au niveau de la confluence Cheltan-Paghman.

Les relations nappes-rivières ont été étudiées en mesurant des pertes entre trois points de mesure amont et un point de mesure aval (cf annexe 19) et le taux d'infiltration est alors de 34%.

3.2.2.6.4 Résumé des caractéristiques des aquifères

On remarque que Böckh dans son rapport a préféré citer comme valeurs de largeurs moyennes celles obtenues à partir des études géophysiques (cf figure 13). Sur les coupes géologiques, les largeurs sont beaucoup plus importantes et on remarque que les valeurs moyennes de perméabilité sont obtenues à partir de puits répartis sur toute la longueur des profils (cf figure 13). Les calculs de flux souterrains seront donc basés sur les dimensions des aquifères mesurés à partir de ces profils.

Aquifère	Epaisseur moyenne en m	Largeur d'après les études géophysiques en m	Largeur d'après les profils géologiques en m	Longueur en m	Perméabilité moyenne en m/s
Paghman	45	4000	4500	10000	0.00018
Kabul Ouest	60	2500	4063	9000	0.00028
Kabul Est	10 à 30	2000		11000	
Logar	30 à 40	2000	2700	19000	0.00052

Tableau 2: Caractéristiques des aquifères dans la région de Kaboul

3.2.2.7 Population, activités, besoins en eau

Nous ne disposons que de très peu de données concernant les prélèvements, que ce soit pour l'eau destinée à la consommation, l'irrigation ou l'industrie.

Pour l'agriculture, des données sont fournies dans la zone du bassin de Logar où on estime la surface irriguée à 33000 hectares et le volume d'eau utilisé par an à $380 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (réf 2). Dans le même rapport les estimations pour le bassin de Kaboul sont de 10500 hectares irrigués avec $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Cependant aucune indication particulière n'est fournie sur le fondement de ces valeurs, en particulier à quelles zones précises elles se rapportent donc celles-ci ne seront pas utilisées. On sait que globalement 85% des cultures sont des cultures irriguées dans la région, que les principales cultures sont le blé, le maïs et que l'irrigation s'effectue majoritairement par canaux en utilisant les eaux de surface. Dans une étude il est estimé que 188000 ha sont irrigués par des sources, 163000 ha par les systèmes de karez et 12100 ha seulement par des puits peu profonds dans la région (réf 1).

Pour l'eau destinée à la consommation, des estimations peuvent être faites à partir de données sur la population et d'une consommation de base par jour et par habitant. La population était de 320000 habitants en 1962. Elle a augmenté de façon spectaculaire ces dernières années, il est estimé qu'en 2001 la ville ne comptait que 1,8 millions d'habitants et qu'elle atteint aujourd'hui au moins les 3 millions. Les prévisions sont de l'ordre de 3,5 millions pour 2010 (cf figure 17).

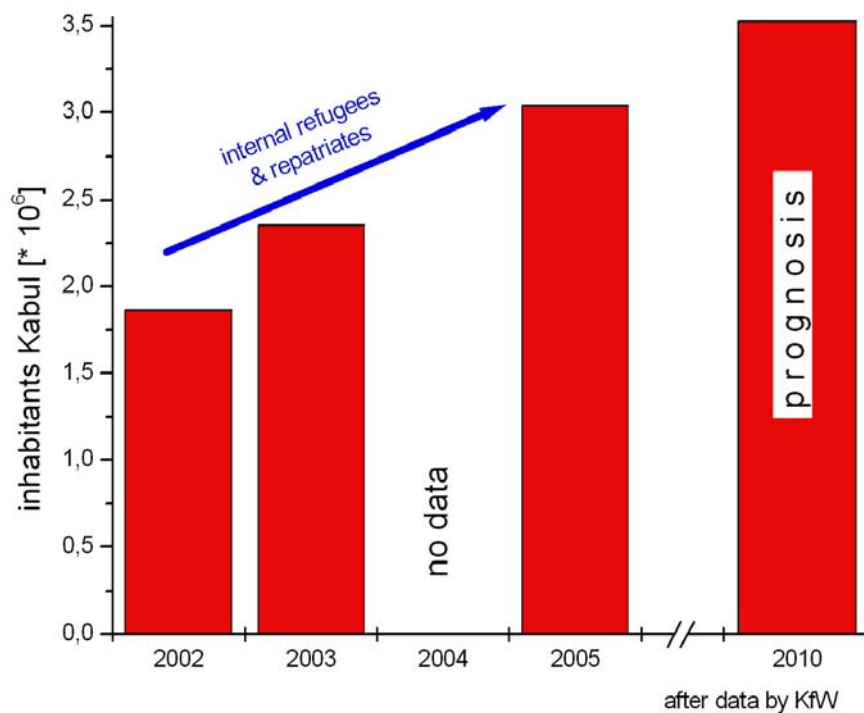


Figure 17 : Prévion pour l'évolution de la population à Kaboul

3.2.3 Modèle conceptuel

3.2.3.1 Modélisation et objectifs

La réalisation d'un modèle conceptuel est une étape préalable à toute réalisation de modèle plus complexe mathématique ou numérique. Celui-ci permet d'identifier les principaux processus à prendre en compte dans le fonctionnement d'un système défini. La zone d'étude est située au niveau de la ville de Kaboul, il s'agit d'un bassin sédimentaire géologique précis, mais qui représente aussi la zone aval et l'exutoire d'un grand bassin hydrologique qu'est le bassin du fleuve Kaboul.

Il s'agit de comprendre le fonctionnement hydrologique global de la zone d'étude en réalisant un bilan, ainsi que le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère en réalisant un modèle numérique avec le logiciel SPRING pour modéliser les écoulements souterrains. Ce dernier simule uniquement le comportement de l'eau dans la zone saturée. Les phénomènes de surface (ruissellement) et se produisant dans la zone non saturée (ZNS) ne sont pas simulés (infiltration). Les interactions entre l'aquifère et l'extérieure sont prises en compte par les conditions aux limites (cf § 4.1.2.2).

Le bilan hydrologique reste incomplet, toutes les composantes identifiées ne peuvent être quantifiées faute de données. Le calcul des valeurs mensuelles ou annuelles représentatives sont intégrées au modèle numérique pour les simulations (cf annexe 4). On montre également que cette démarche permet de faire de premières estimations concernant les composantes inconnues du bilan.

3.2.3.2 Bilan hydrologique

L'approche du bilan hydrologique est délicate dès lors que les données utilisées ne sont peut être pas comparables. En effet elles se réfèrent toutes à des dates différentes et sont issues d'enregistrements plus ou moins ponctuels dans le temps et l'espace. Par exemple pour les cours d'eau on ne dispose que de valeurs moyennes mensuelles issues de mesures enregistrées entre 1959 et 1964 ; pour le Paghman, seules les valeurs de l'année 64 sont disponibles. Pour les données climatologiques les chroniques sont plus longues mais ne sont fournies que par une seule station de mesure (aéroport de Kaboul).

Evolution du système et conséquences

Un autre aspect difficile dans cette étude réside dans le changement d'état du système dans le temps. La plupart des investigations ont été effectuées dans les années 60 à 78, époque où l'influence humaine sur le fonctionnement du système aquifère dans la zone devait être relativement plus faible. Aujourd'hui l'état du système a changé, du fait des activités humaines et d'un climat de sécheresse.

Les activités humaines sont :

- des prélèvements plus nombreux qui ont semble-t-il contribué à la baisse du niveau piézométrique ;
- l'expansion et la densification du paysage urbain ainsi que la construction d'infrastructures et d'ouvrages d'art (cf figures 18 et 19).

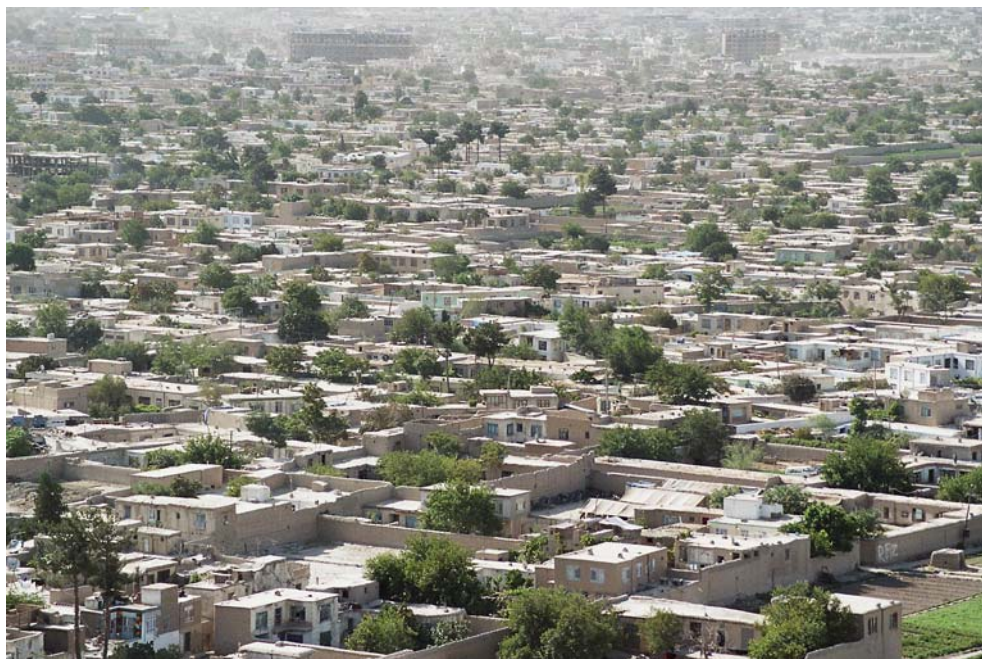


Figure 18 : Densification du paysage urbain à Kaboul (T.Krekeler)



Figure 19 : Retenue d'eau en amont du Kaboul (T.Krekeler)

Tous ces facteurs ont pu modifier les processus d'écoulement et les propriétés infiltrantes des sols sur les versants et dans la plaine et donc les conditions de recharge.

La sécheresse actuelle implique des conditions de recharge moins importantes (composantes manquantes ou amoindries et/ou zones où la recharge est nulle et/ou période de recharge restreinte) ; elle a engendré la disparition de la végétation et l'érosion des sols. Ceci implique une évapo-transpiration due aux plantes moins importante, une modification des propriétés des sols et donc des processus d'infiltration et de réévaporation (on peut penser que sans couverture végétale l'évaporation à la surface du sol et dans le sol peut être favorisée).

Enfin les inondations qui ont parfois lieu au printemps dues aux fortes pluies et à la fonte des neiges peuvent également entraîner des problèmes d'érosion des sols. Il serait intéressant de savoir si ces problèmes d'inondations sont relativement récents ou non pour savoir s'ils peuvent être expliqués par les changements actuels (fonte des neiges trop rapide à cause du climat, trop de ruissellement à cause de l'imperméabilisation des sols). Ces surplus d'eaux constitueraient une réserve importante d'eau s'ils pouvaient être collectés. Il est estimé par exemple que dans les systèmes de karez, environ 25% de l'eau est perdue au printemps (réf 1).

Si l'environnement et les pressions extérieures ont entraîné la modification de l'état du système, le nouvel état implique en retour lui aussi une modification du fonctionnement du système et des processus qui le conditionnent. En ce qui concerne les processus d'évaporation dans la zone non saturée par exemple, on peut penser que suivant l'état du niveau piézométrique, les taux d'évaporation seront plus ou moins importants. En effet l'évaporation et les remontées capillaires dans une couche de sol dépendent en partie de sa granulométrie. Dans la zone d'étude, des couches de silts (limons, loess) plus ou moins épaisses recouvrent en général les couches de sables et graviers à granulométrie plus grossière. Les processus de remontée capillaire et d'évaporation dans le sol peuvent suivant les climats et les conditions du sol affecter des zones jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur. On peut donc faire l'hypothèse que ces processus sont plus intenses lorsque le niveau de la nappe est proche de la surface dans les formations silteuses soit lorsque la force capillaire est plus élevée ; tandis que si le niveau est plus profond et n'atteint pas la couche de silts, les remontées capillaires sont moins importantes.

Ceci implique une grande prudence pour la réalisation de simulations par la suite. En effet, même s'il est possible de simuler l'évolution passée du système et peut-être son évolution jusqu'à aujourd'hui, il serait possible mais peut-être pas pertinent de simuler des évolutions possibles pour les prochaines années dès lors que le fonctionnement actuel du système est peut-être différent de celui du passé. Il faut donc continuer d'étudier le système, tout en sachant que les données actuelles ne sont peut-être plus concordantes avec le fonctionnement du système passé et ne peuvent donc peut être pas être complémentaires des données représentant ce dernier.

Le bilan hydrologique réalisé est une approche largement simplifiée de la réalité. On peut supposer que de nombreux processus complexes puissent intervenir et modifier de façon significative le bilan hydrologique dans le bassin, cependant faute de connaissances plus précises du terrain d'une part et du fait que ces processus sont parfois difficiles à apprécier et à mesurer, ils ne pourront pas être pris correctement en compte dans cette étude. Les connaissances manquantes concernent tous les processus de circulation de l'eau dans la zone non saturée du sol soit :

- l'infiltration de la pluie efficace dans le sol jusqu'à la zone saturée ;
- l'infiltration de l'eau du fleuve jusqu'à la zone saturée ;
- les processus d'évaporation et de remontée capillaire dans les sols ;
- le processus de fonte de la neige et le volume d'eau en résultant ;
- par ailleurs un processus de sublimation de la neige dû à une forte évaporation n'est pas impossible.

Nous allons donc dans un premier temps détailler et calculer pour chaque composante connue de l'équation les valeurs de flux associés. Dans un deuxième temps plusieurs hypothèses seront présentées pour tenter de comprendre le fonctionnement hydrologique dans la zone d'étude et les premières estimations pourront être faites.

3.2.3.2.1 Les composantes du bilan

3.2.3.2.1.1 Les entrées

Les eaux souterraines

Il s'agit des eaux des systèmes aquifères limitrophes de la zone d'étude, soit en provenance de la vallée du Paghman à l'Ouest, de la vallée du Kaboul au Sud-Ouest et de la vallée du Logar au Sud-est. Pour représenter ces apports au niveau des limites de notre modèle (cf § 4.1.1.1) nous calculons un flux passant à travers une section idéalisée en utilisant la loi de Darcy :

$$Q=KAi$$

où Q en m³/s est le volume d'eau traversant la section A en une unité de temps sous l'effet du gradient hydraulique i ; K est le coefficient de perméabilité en m/s ; A la surface de la section passante en m² et i sans dimension le gradient hydraulique dans la zone.

Les profils de ces aquifères disponibles dans le rapport de Böckh sont situés non loin des limites de notre zone d'étude sauf pour l'aquifère du Logar. Les données utilisées pour le calcul sont les profils géologiques des sections permettant de mesurer la largeur et les épaisseurs des vallées du Kaboul et du Paghman, ainsi que les perméabilités moyennes de chaque aquifère (cf § 3.2.2.6). Pour l'aquifère du Logar la largeur est mesurée au niveau de la limite de la zone d'étude et l'épaisseur est estimée à 40 m. Quant au gradient hydraulique il est calculé à partir des cartes piézométriques réalisées à partir des études de 62-63. Dans le bassin de Darulaman, on obtient 4*10⁻³ pour l'aquifère de Paghman et 3*10⁻³ pour celui de Kaboul et dans la plaine un gradient de 1,5*10⁻³ est mesuré au niveau du Logar dans la zone au dessous de Shewaki. Ces valeurs correspondent globalement à la pente observée au niveau du sol dans la zone grâce à GoogleEarth (cf § 4.1.2.2.1).

Aquifère	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Section passante en m ²	Gradient hydraulique mesuré	Perméabilité moyenne en m/s
Paghman	45	4500	202500	0.004	0.00018
Kaboul	40	4063	162520	0.003	0.00028
Logar	40	2700	108000	0.0015	0.00052

Tableau 3: Caractéristiques des aquifères pour le calcul de l'écoulement moyen

On peut ensuite calculer un volume écoulé à travers les sections passantes pour différentes unités de temps. Pour établir une année standard on distingue les périodes de hautes eaux (Mars, Avril, Mai) et celles de basses eaux. Il est difficile d'identifier une période précise pour les basses eaux. La fonte des neiges en amont des bassins versants peut avoir lieu et alimenter les cours d'eau jusqu'en Juillet ; les débits observés au début des années 60 (cf figure 11) montrent une période de basse eaux entre Août et Octobre pour les cours d'eaux. La période d'irrigation intensive commence en Juin et se termine en Septembre et suivant le mode d'irrigation (pompage ou dérivation) et la localisation des zones de prélèvements et des zones irriguées, cette activité peut plus ou moins affecter les eaux souterraines. Une recharge par les pluies n'est pas possible avant Décembre, mais de fortes pluies de moussons ont parfois lieu à la fin de l'été. Finalement on considère la période d'Août à Octobre pour représenter les basses eaux.

La variation de l'épaisseur mouillée de la nappe implique celle du flux passant. Le battement observé dans la région dans les années 62-63 était d'environ 1 à 2 m et pouvait atteindre 5 m dans la partie Sud de la vallée (réf 3). Une autre valeur du battement est donnée entre 0,2 et 2 m (réf 2). Les niveaux piézométriques des sections correspondent au mois de Juillet pour Logar et Kabul et à Novembre pour Paghman. Les hautes eaux seront représentées avec 3 m d'épaisseur en plus et les autres mois de l'année avec 1 m par rapport au niveau les plus bas (Juillet, Août et Septembre). Les calculs sont effectués pour chaque aquifère (cf annexe 17) et une moyenne pondérée permet d'obtenir les valeurs standards suivantes :

Aquifère	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	m ³ /an	Millions m ³ /an
Paghman	0.145	375791	4572121	4.57
Kabul	0.139	359696	4376306	4.38
Logar	0.086	223008	2713269	2.71
Total	0.370	958496	11661696	11.66

Tableau 4: Ecoulements souterrains moyens dans les années 60-70

Actuellement les niveaux piézométriques étant plus bas, les sections passantes sont moins importantes. En ce qui concerne les paramètres hydrodynamiques des couches aquifères on considère que ceux-ci sont peu variables sur une période de 50 ans. On remarque cependant que si les niveaux sont 7 m plus profonds, la part des limons diminue dans la section, ce qui pourrait faire varier la perméabilité moyenne. Les flux actuels, estimés avec les mêmes valeurs de perméabilité, figurent dans le tableau ci-dessous :

Aquifère	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	m ³ /an	Millions m ³ /an
Paghman	0.123	317657	3864831	3.86
Kabul	0.115	298657	3633660	3.63
Logar	0.071	185165	2252835	2.25
Total	0.309	801479	9751327	9.75

Tableau 5: Ecoulements souterrains moyens dans les années 2000

Les eaux de surface

Il s'agit des cours d'eau, des pluies efficaces, et de l'eau stockée sous forme de neige. Ces eaux sont susceptibles de s'infiltrer dans le sol et constituent des recharges potentielles pour les eaux souterraines, il s'agit de l'infiltration efficace, de l'infiltration de la neige fondue, des eaux des cours d'eau, des canaux d'irrigation et des parcelles irriguées, des eaux de ruissellement, des eaux de rejets (eaux usées, industrielles). A partir des données disponibles seules les composantes suivantes peuvent être quantifiées :

Les pluies

D'après les calculs d'évapotranspiration avec la formule de Turc, la pluie efficace est de 27 mm/m²/an ce qui revient à un volume disponible de 7,8*10⁶ m³ en prenant en compte la surface de notre modèle (290 km²). Les valeurs obtenues avec Turc sont des valeurs annuelles moyennes ; l'étude des valeurs mensuelles avec la formule d'Ivanov montre cependant qu'une recharge à partir des pluies n'est possible qu'entre Décembre et Avril. On utilise donc les valeurs obtenues avec Turc pour élaborer une année standard mais en répartissant le volume annuel entre les mois de Décembre et Avril (cf annexe 4).

Suivant la capacité des sols à l'infiltration, l'eau des pluies efficaces peut être soumise à différents processus tels que le ruissellement et l'évaporation si la capacité d'infiltration des sols est faible ; une réévaporation dans le sol par remontée capillaire avant d'atteindre la nappe est aussi possible. Nous disposons de peu de renseignement concernant ces phénomènes et il est difficile d'estimer quels sont les volumes susceptibles d'atteindre la nappe. Le calcul des indices de drainage de Hénin-Aubert montre que la capacité des sols à l'infiltration dans la région est de 30,1 mm pour les sables et de 20,5 mm pour les limons (cf § 3.2.2.4.3). La couche de limons est absente dans la zone de liberté des cours d'eau au niveau des profils géologiques des vallées de Paghman et de Kaboul, on peut penser que les autres portions de cours d'eau dans la zone présentent ces caractéristiques et que l'infiltration est plus propice à ces endroits. Ces zones ainsi que les pentes et pieds de versants sont d'ailleurs décrites comme perméables contrairement aux autres surfaces présentant de faible taux d'infiltration (réf 2).

Finalement on peut faire plusieurs hypothèses :

- la situation est idéalisée en considérant que 100% des 27 mm s'infiltrent, ils sont applicables soit à toute la zone d'étude, soit juste en bordure des fleuves;
- on utilise les indices de drainage de Hénin-Aubert calculés en considérant que toute la zone est recouverte de limons sauf à proximité des cours d'eau ;
- on considère comme improbable la recharge des eaux souterraines par les pluies et on néglige cet apport.

	100% d'infiltration dans toute la zone	100% d'infiltration en bordures des fleuves	Utilisation de l'indice de drainage de Hénin-Aubert	Aucune infiltration possible
Infiltration annuelle en m3	7854295	915636	6167581	0
Infiltration mensuelle en m3 (sur 12 mois)	654525	76303	513965	0

Tableau 6: Recharge des eaux souterraines par les pluies suivant différentes hypothèses

Les cours d'eau

Les stations de jaugeage sont à peu près situées aux limites de notre zone d'étude, on considère donc que les débits moyens mesurés peuvent servir à quantifier les volumes d'eau entrant dans la zone. Néanmoins des mesures sur trois ans ne permettent pas de dire qu'elles sont représentatives du régime des cours d'eau (si on considère que le débit moyen est normalement calculé sur une période de 10 ans).

Cours d'eau et stations de jaugeage	Débit moyen en m ³ /s (1962-64)	Volume mensuel d'eau écoulé en m ³	Volume annuel d'eau écoulé en millions m ³
Paghman amont (Pule Sohka)	0.884	2291760	27.88
Kabul amont (Tangi Saydan)	3.543	9182880	111.73
Logar amont (Sange Nawesta)	10.070	26101440	317.57
Total	14.497	37576080	457.18

Tableau 7: Débits moyens enregistrés en amont des cours d'eau et volumes d'eau associés

Dans le modèle numérique les relations entre le système aquifère et les cours d'eau peuvent être prises en compte. Cependant, d'une part l'existence de cette relation n'est pas clairement démontrée dans toutes les zones, d'autre part il est difficile d'estimer les volumes d'eau pouvant s'infiltrer et s'exfiltrer puisque aucune information n'est disponible concernant l'état de colmatage des berges. Les infiltrations à partir des canaux d'irrigation ne sont pas prises en compte dans le modèle.

Les relations nappes rivières étudiées en 62-63 par les scientifiques russes dans certaines zones de notre domaine d'étude (cf § 3.2.1.3) sont utilisées et appliquées à toute la zone pour faire des estimations. Les débits des cours d'eau entre deux stations de jaugeage amont-aval ont été mesurés pendant 1 an. La différence étant considérée comme l'eau s'étant infiltrée dans la nappe pendant cette période. Cependant, les prélèvements effectués dans la zone pendant l'étude (irrigation, eau potable, industrie) ne sont pas connus et donc non pris en compte, de même que les apports possibles par ruissellement des eaux pluviales ou usées.

Cours d'eau	Distance entre les stations de jaugeage mesurée sur cartes papiers en m	Pertes en 1 an en m ³	Infiltration moyenne en m ³ /m/an
Paghman	7000	7568640	1081
Kaboul	6000	25400000	4233
Logar	12000	4800000	400

Tableau 8: Infiltration moyenne possible au niveau des portions de cours d'eau étudiés

L'utilisation d'une valeur moyenne d'infiltration suppose que les capacités d'infiltration soient les mêmes en tout point du tronçon considéré. De plus les distances entre les stations de jaugeage sont mesurées grossièrement alors que les fleuves présentent de nombreux petits méandres ; la longueur totale des cours d'eau doit donc être plus grande que les valeurs ci-dessus et les infiltrations moyennes sur-estimées. On remarque également que la valeur obtenue pour le Kaboul est très élevée. On rappelle que les études réalisées en 62-63 ne prenaient pas en compte les pertes dues à l'irrigation entre les deux stations de jaugeage amont et aval ; ceci peut peut-être expliquer le taux d'infiltration estimé pour le Kaboul.

Les valeurs obtenues à partir des études d'infiltration sont peu fiables et leur utilisation est délicate. Il est difficile d'estimer leur représentativité et donc d'extrapoler ces valeurs aux autres portions des cours d'eaux tout comme il est difficile de faire une moyenne pertinente. Cependant pour tenter d'estimer grossièrement les volumes annuels maximums d'eaux des cours d'eaux susceptibles de participer à la recharge des eaux souterraines on peut faire les remarques suivantes :

- Les matériaux sont plus grossiers dans le bassin de Darulaman car ils se sont déposés aux pieds des versants et l'activité érosive des cours d'eau peut être plus importante du fait de la pente dans cette zone, tandis que dans la plaine de Kaboul les dépôts sont décrits comme étant plus fins et la pente est moins importante. Les profils géologiques montrent d'ailleurs que la couche de limons n'est pas érodée au niveau du cours du Logar. Différents calculs sont effectués en conservant les résultats pour les Kaboul et Paghman et en utilisant la valeur arbitraire de 2000 m³/m/an. Pour le Logar et le cours inférieur du Kaboul on utilise la valeur de 400 m³/m/an;
- On affecte ces valeurs à tout le réseau hydrographique sauf à la partie modélisée comme exutoire du bassin où l'exfiltration est supposée comme prédominante sur l'infiltration.

Portions de cours d'eau	Longueur des tronçons mesurée dans le programme XSUSI en m	Infiltration possible en m ³ /m/an	Infiltration possible en 10 ⁶ m ³ /an	Infiltration possible en m ³ /m/an	Infiltration maximum possible en 10 ⁶ m ³ /an
Paghman	4580	1081	4.95	2000	9.16
Kaboul1 (cf figure 26)	6521	4233	27.61	2000	13.0
Kaboul 2 (cf figure 26)	14125	400	5.65	400	5.65
Logar	15535	400	6.21	400	6.21
Kaboul 3 (cf figure 26) sauf le tronçon représentant l'exutoire	4240	400	1.70	400	1.70
Total	45001		46.12		35.76

Tableau 9: Volumes d'eaux disponibles pour l'infiltration pour chaque portion de cours d'eau

D'autres cours d'eau affluents du Kaboul, cités dans le rapport de Pias pourraient peut être avoir une influence dans le bilan. Il s'agit après la confluence avec le Logar, en rive droite du Butkhak Khwar (Rodjan) et en rive gauche, peut avant l'entrée dans les gorges de Tangi Gharu des petits cours d'eau Dwa Khwara et Loy Khwar descendus du Khojo Ghare Wali (2990-3020 m) (réf 4). Faute de données, ils ne sont pas pris en compte. Non cités dans la majeure partie des études disponibles sur la région on suppose qu'ils sont de faibles importances et qu'ils ne peuvent avoir qu'une influence moindre voire nulle sur le bilan hydrologique.

Les eaux de ruissellement et de fonte des neiges

« La jonction entre les massifs et la vallée du Logar se fait par l'intermédiaire de glacis de piedmont généralement constitués par des conglomérats entre 2000 et 2500 m d'altitude. Ces piedmonts sont entaillés d'importantes vallées de rivières intermittentes rejoignant le Logar. Celles-ci varient entre 2000 et 1800 m dans la région de Kaboul » (réf 4).

Ce commentaire laisse à penser qu'une partie des eaux de ruissellement et de fonte des neiges rejoint directement la plaine et les cours d'eau par l'intermédiaire de réseaux hydrographiques locaux ou de systèmes de karez. Ces eaux peuvent aussi s'infiltrer aux pieds des versants ou dans la plaine. Quoiqu'il en soit ces apports peuvent être importants du fait des fortes pentes et altitudes élevées des reliefs qui ceinturent la zone d'étude, cependant aucune information précise ne permet de les quantifier.

3.2.3.2.1.2 Les sorties

Evaporation et évapo-transpiration

L'évapotranspiration réelle calculée d'après Turc est déjà prise en compte dans le calcul des pluies efficaces.

En revanche en dehors des pluies il est difficile d'estimer les quantités d'eau pouvant être évaporées ou évapo-transpirées dans la région. Il s'agit de l'évaporation de l'eau dans les sols par remontée capillaire, de l'évaporation de toute les surfaces en eau libre (lacs, marais, rivières et canaux), de l'évaporation des eaux utilisées pour les activités humaines quotidiennes et industrielles et de la sublimation de la neige si ce processus est possible dans cette zone.

L'évaporation ne peut être quantifiée. L'évaporation pourrait affecter les eaux souterraines, suivant les propriétés des sols et d'autant plus que le niveau piézométrique est proche de la surface.

Les prélèvements

Globalement nous ne disposons d'aucune information précise concernant les prélèvements.

Pour l'eau destinée aux usages quotidiens, des estimations peuvent être faites en utilisant les données concernant l'évolution de la population et une consommation de base par habitant. Les valeurs disponibles sont : 320000 habitants en 1962 et 590000 habitants en 1972 (réf 2), 1,8 millions en 2001. Aujourd'hui on estime que la population atteint 3 millions et qu'elle pourrait dépasser les 3,5 millions d'habitants en 2010. En considérant différentes consommations de base journalières on obtient les valeurs suivantes :

Nombre d'habitants	Consommation en m ³ /j/hab			
	0.02	0.04	0.06	0.1
320000	2.34	4.67	7.01	11.68
1500000	10.95	21.90	32.85	54.75
3000000	21.90	43.80	65.70	109.50
3500000	25.55	51.10	76.65	127.75
4500000	32.85	65.70	98.55	164.25

Tableau 10: Estimation des besoins en eau pour l'usage quotidien exprimés en millions de mètres cubes par an.

En ce qui concerne les prélèvements industriels, des données d'essais de pompage effectués sur des ouvrages créés entre les années 60 et 80 permettent d'avoir une idée des prélèvements effectués dans la zone à l'époque. Alors que des ouvrages utilisés pour l'alimentation en eau de certains quartiers de la ville (Microroyan par exemple) ont des débits de l'ordre de 25 à 40 L/s, le débit d'un ouvrage appartenant à une industrie textile est de 100L/s. Sur un an ce débit représente déjà $1,29 \cdot 10^6$ m³ (en considérant un fonctionnement à débit constant 12h/j et 5j/semaine). Ceci démontre l'importance des prélèvements dus à l'industrie. Pour connaître plus précisément ces prélèvements il faudrait disposer d'un recensement des activités susceptibles de prélever d'importantes quantités d'eau dans la région et contacter les responsables pour connaître les volumes prélevés. Peut-être serait-il possible de s'adresser au ministère afghan des Mines et de l'Industrie (MMI).

Les prélèvements destinés à l'irrigation sont difficiles à estimer. Les campagnes d'irrigation commencent en Avril et se terminent en Octobre avec une période plus intensive entre Juin et Septembre (réf 3).

Pour plus de précisions il faudrait connaître exactement les volumes prélevés. Ceci est difficile d'une part car cela implique un recensement de tous les points de prélèvement possibles, des textes réglementaires précisant les droits et conditions de prélèvement et des moyens de transmissions des informations ; d'autre part car techniquement cela demande la mise en place de systèmes de mesure adéquates selon les modes de prélèvement. Une grande part de l'irrigation se fait par canaux alimentés par les eaux de surface dans la région, or il n'existe pas de système de mesure simple et fiable pour mesurer les prélèvements d'eau par dérivation de cours d'eau.

Néanmoins des estimations pourraient être faites en connaissant pour chaque culture, le nombre d'hectares irrigués et les besoins en eau de la plante.

L'irrigation affecte les eaux de surface (prélèvements par dérivation) mais aussi les eaux souterraines lorsque les prélèvements sont effectués par pompage et indirectement dans les zones où la recharge normalement due aux infiltrations du fleuve est diminuée par la baisse du niveau des cours d'eaux (canaux étanches transportant l'eau dans une autre zone). En revanche l'irrigation peut entraîner un apport d'eau dans les zones perméables en considérant une infiltration de 30% du volume utilisé.



Figure 20 : Photo satellite prise au niveau du village de Bagrami, GoogleEarth

On remarque également qu'elle ne s'effectue pas en zone urbaine et qu'elle ne concerne donc qu'une partie de la zone d'étude, en particulier toute la partie Sud et Sud-Est (cf figure 20). L'irrigation s'effectue majoritairement dans les hauts de vallées dans la région (cf figure 21).



Figure 21 : Vallée du Paghman en Août 2005 (T.Krekeler)

L'écoulement à l'exutoire

Des mesures ont été effectuées à la station de Tangi Gharu pour les années 1959 à 64, en aval du fleuve Kaboul, avant que celui-ci ne se jette dans les gorges de Tangi Gharu. Ce point est considéré comme l'exutoire de l'ensemble des eaux du bassin. Cependant des pertes à d'autres endroits, notamment vers le Nord ne sont pas exclues.

On remarque que les débits enregistrés à Tangi Gharu pour les années 60 et 61 sont environ 1,5 fois supérieurs à ceux des années 62 à 64. Les écoulements en amont et en aval du réseau hydrographique étant logiquement liés, pour pouvoir comparer ces écoulements il faut travailler sur les mêmes années. Les seules mesures disponibles et utilisées pour les stations en amont sont 62 à 64, on devrait donc ne prendre en compte que ces années pour calculer les volumes sortant à Tangi Gharu. Plusieurs informations favorisent l'hypothèse de variations climatiques pour expliquer cette différence, d'une part les sommes des débits des cours d'eau amont sont du même ordre de grandeur que les débits enregistrés à Tangi Gharu pour les années 62, 63 et 64.

Années	Cumul des débits moyens annuels amont en m ³ /s	Débit moyen annuel enregistré en aval à Tangi Gharu en m ³ /s
62	13.663	13.098
63	12.091	13.233
64	17.133	18.788

Tableau 11: Comparaison des débits moyens annuels en amont et en aval du bassin

Aucune information n'indique de perturbation majeure des écoulements dans la zone d'étude à partir des années 62 et les années 60 et 61 présentent de fortes pluviométries. Cette dernière affirmation est basée sur les données de deux stations ce qui n'est peut être pas suffisant pour qualifier une année comme pluvieuse étant donné que les variations peuvent être importantes suivant les points de mesure.

Finalement on considère comme approprié de ne prendre en compte que les années 62 à 64 pour calculer les volumes d'eau sortant à l'exutoire qui seront utilisés dans le bilan.

Cours d'eau et stations de jaugeage	Débit moyen en m ³ /s (1962-64)	Volume mensuel d'eau écoulé en m ³	Volume annuel d'eau écoulé en millions m ³
Kaboul (Tangi Gharu)	15.039	38981520	474.28

Tableau 12: Débits moyens enregistrés en aval du bassin et volume d'eau associé

3.2.3.2.1.3 La variation de stock

Elle est due à une perte ou un apport d'eau dans l'aquifère et s'observe par une baisse ou une élévation du niveau piézométrique. La variation de stock dans un aquifère peut être celle due au battement annuel d'une nappe. Le volume d'eau mis en jeu correspond alors à la réserve régulatrice. A long terme si le système est stable, soit si le niveau piézométrique reste constant sur plusieurs années, la variation de stock est nulle. En revanche si le système change au cours du

temps comme c'est le cas à Kaboul, il faut calculer la variation de stock associée à la baisse du niveau piézométrique.

Dans un aquifère libre, la variation du niveau piézométrique Δh en m correspond à la variation de l'épaisseur mouillée de l'aquifère, soit un certain volume V de réservoir rapporté à sa surface A . La variation de stock Δstock du volume d'eau en m^3 , entrant ou sortant du système, dépend de la fonction capacitive conductive du réservoir et il est calculé à partir du volume de la tranche de réservoir mise en jeu et de la porosité efficace n_e sans dimension. On utilise la porosité efficace car le but est d'estimer le volume d'eau mobile.

$$\pm \Delta \text{stock} = V * n_e$$

Dans un aquifère captif la variation de stock ne se traduit pas par un changement de l'épaisseur mouillée. Les variations du niveau piézométrique traduisent une augmentation ou diminution de la pression au sein du système et le volume d'eau mis en jeu dépend alors du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère ($V=A * \Delta h$).

$$\pm \Delta \text{stock} = V * S$$

Dans cette étude on considère le système aquifère dans la région de Kaboul comme libre. L'épaisseur de la tranche de réservoir mise en jeu peut être variable dans l'espace, mais nous ne disposons pas suffisamment de mesures précises de niveaux piézométriques des années 60 pour les comparer à celles effectuées ces dernières années. Il est donc difficile d'estimer avec une bonne précision cette épaisseur et on considère donc l'information générale d'une baisse des niveaux piézométriques d'environ 6-7m et pouvant aller jusqu'à 20 m dans certaines zones.

On idéalise le volume mis en jeu à un parallélépipède ayant pour surface celle de notre modèle (soit 282 km^2) et dont on fait varier les épaisseurs. On considère donc que l'aquifère s'étend sur l'ensemble de la zone.

Les fonctions capacitive et conductive peuvent être très variables dans l'espace du fait de l'hétérogénéité de la nature et des épaisseurs des matériaux constitutifs du réservoir. Une valeur de porosité efficace de 7,5% caractérisant les aquifères figure dans le rapport de Böckh mais aucune indication n'est fournie quant à sa provenance (réf 3). Cette valeur correspond à celles données pour des alluvions, sable silteux ou sable fin (cf annexe 18). Les matériaux constitutifs du système aquifère comportent également des sables et graviers lesquels ont plutôt des valeurs de porosité efficace comprise entre 10 et 30% suivant la granulométrie et des conglomérats, on pourrait donc penser que cette valeur est un peu faible. Cependant les matériaux peuvent aussi être affecté par des phénomènes de compaction et d'induration.

Les variations piézométriques ayant lieu dans les premières couches de sols, soit à priori dans les limons, on considère que la valeur de 7,5% est adaptée pour estimer la variation de stock, le calcul est néanmoins effectué pour d'autres valeurs :

Δh en m	Porosité efficace		
	0.075	0.1	0.13
1	22.28	29.71	38.62
2	44.56	59.42	77.24
7	155.97	207.97	270.36
10	222.82	297.09	386.22

Tableau 13: Variation de stock en millions de mètres cube en fonction des variations piézométriques et de différentes valeurs de porosité efficace.

3.2.3.2.2 Le calcul du bilan

Les données utilisées datent des années 60-70, le bilan est donc valable et interprété pour cette période uniquement, où le système est supposé stable puisque aucune information ne nous révèle l'existence d'une baisse ou d'une élévation majeure des niveaux piézométriques dans ces années là. Pour un état stationnaire, soit un niveau piézométrique constant, les variations de stock sont nulles, le bilan doit s'approcher de zéro et on doit avoir sur le long terme :

$$\text{Flux entrant} = \text{Flux sortant}$$

Les bilans et les données utilisées peuvent être différents suivant l'échelle à laquelle on travaille, il faut donc bien distinguer le bilan hydrologique global du bilan hydrogéologique au niveau du système aquifère. Par exemple dans un bilan global on prend en considération les débits des fleuves qui entrent dans notre zone d'étude et la pluie efficace alors que si le raisonnement s'effectue à l'échelle du système aquifère il faut tenir compte des échanges avec les cours d'eaux et de l'infiltration efficace.

Le bilan global prend en compte à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines et peut être détaillé par l'équation suivante :

Cours d'eau + eaux souterraines + pluie efficace + apports de versants =

Prélèvements eau de consommation + prélèvements irrigation et industrie + évaporation + écoulement à Tangi Gharu

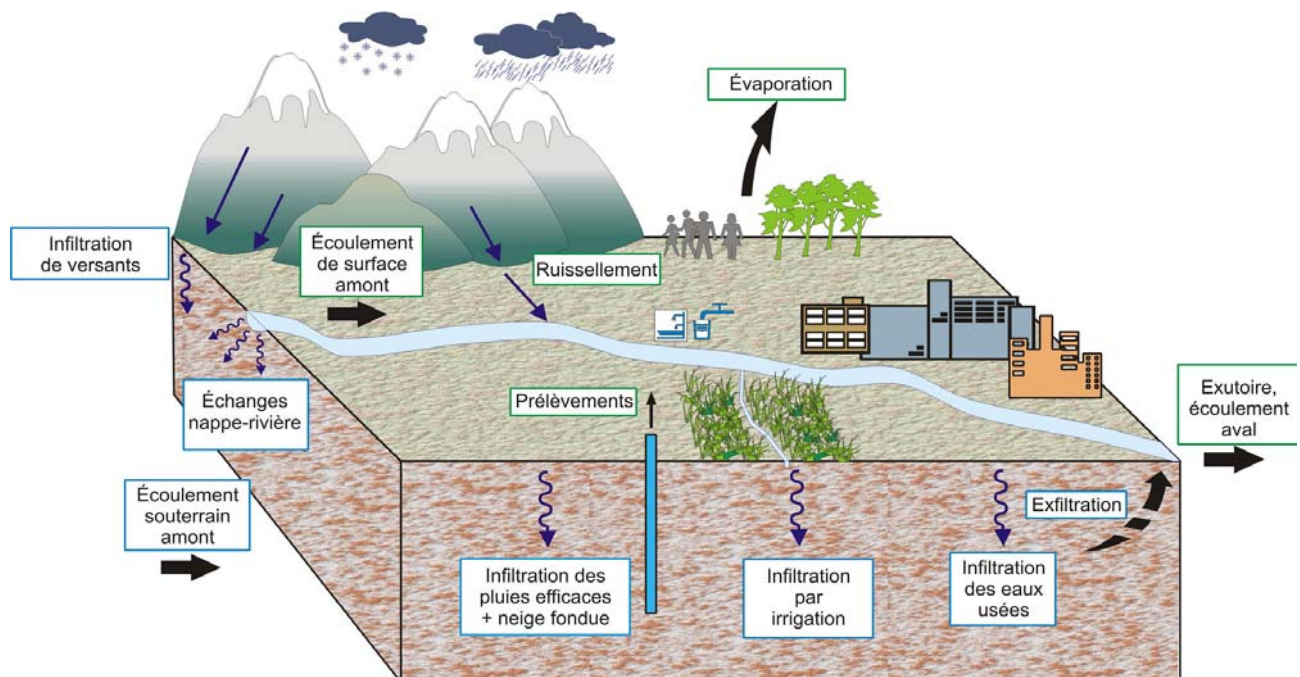


Figure 22 : Modèle conceptuel

En remplaçant par les valeurs calculées précédemment on obtient respectivement en millions de mètres cube par an :

$$457_{(1962-64)} + 12_{(1962-63)} + 8_{(1957-77)} + FN = 7_{(1962)} + P + E + 474_{(1962-64)}$$

soit

$$477 + FN = 481 + P + E$$

Le bilan est basé sur des données peu nombreuses et dont la fiabilité est difficilement vérifiable. Le résultat reflète cependant la plausibilité des calculs effectués pour chaque composante car l'écart entre les entrées et les sorties n'est pas aberrant.

3.2.3.2.2.1 Remarques

Les volumes mis en jeu au niveau annuel sont des millions de mètres cube dont la manipulation est délicate. Pour les cours d'eau, les volumes annuels ont été directement obtenus à partir des débits moyens en m^3/s . Si on fait la somme des volumes mensuels moyens ($V_{\text{mensuel}} \cdot 12$) on trouve des valeurs de $450 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ au lieu de $457 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en amont et $467 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ au lieu de $474 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en aval. L'écart entre les deux est toujours d'environ $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, seulement cela montre bien qu'il faut pour les deux flux utiliser la même méthode de calcul car les erreurs sur le calcul d'une composante peut considérablement changer le bilan.

Une variation de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ sur un débit moyen entraîne par exemple une variation du volume annuel de $0,32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Une variation de 5m pour l'épaisseur moyenne des aquifères entraîne une variation du volume annuel entrant de $1,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Finalement l'interprétation du bilan est difficile pour deux raisons majeures. D'une part, celui-ci est basé sur peu de données et suivant les hypothèses considérées, les imprécisions des mesures, les erreurs de calculs possibles, le bilan peut varier. L'interprétation ne doit donc pas uniquement se baser sur la seule équation du bilan.

D'autre part, les composantes inconnues sont nombreuses dans l'équation ce qui rend difficile leur estimation. En effet, en partant du principe que le bilan doit être équilibré, on peut trouver un grand nombre de combinaisons possibles pour les valeurs affectées aux inconnues tant que celles-ci se compensent.

Pour la suite de l'étude, plusieurs calculs seront effectués à partir du bilan obtenu mais surtout à partir d'autres études des données disponibles et en se basant sur différentes hypothèses. Les estimations obtenues pour les inconnues du bilan ne sont que des ordres de grandeur possibles et ne s'avéreront réalistes que lorsqu'elles pourront être vérifiées par d'autres études et mesures sur le terrain.

3.2.3.2.2.2 Estimation des composantes inconnues du bilan

Si on considère que le bilan doit être théoriquement équilibré, on voit déjà que la seule entrée disponible pour compenser les pertes sont **les apports de versants**.

Mais à partir de quelle valeur d'écart peut-on considérer le bilan comme déséquilibré ? Une variation de stock d'un mètre représente un volume d'environ $22 \text{ à } 38 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, une variation de $0,20 \text{ m}$ représente un volume de $4 \text{ à } 7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ainsi à partir d'un écart supérieur à $22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ entre les flux entrants et sortants on considère le bilan comme déséquilibré. On peut considérer le bilan équilibré quand l'écart reste inférieur à $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Si on considère que les prélèvements dus à l'irrigation et à l'industrie doivent considérablement augmenter les sorties, alors l'apport des eaux de fonte des neiges ne doit pas être négligeable, il est cependant impossible de donner une valeur.

Si en plus on fait l'hypothèse que le système peut perdre une partie de ces eaux au Nord de la zone d'étude, les apports dus à la fonte des neiges seraient encore plus importants. Si on considère le système ouvert au Nord, pourquoi ne pas considérer des apports possibles ? Il faudrait avoir plus d'informations sur la géologie dans cette zone afin de déterminer si des échanges d'eau souterraine sont possibles et quels seraient les volumes alors mis en jeu.

3.2.3.2.2.3 Réflexion sur Tangi Gharu, exutoire supposé du système

Si on fait l'hypothèse que Tangi Gharu draine la totalité des eaux de surface et des eaux souterraines du bassin, on peut, en étudiant les variations mensuelles de débits à l'exutoire et en les comparant aux écoulements amont entrants dans la zone d'étude, essayer de différencier et de quantifier les différentes sources de recharge possibles d'une part, mais aussi évaluer d'autres composantes du bilan comme l'évaporation et les prélèvements.

Mois	Cumul des débits moyens amont en m ³ /s	Débit aval enregistré à Tangi Gharu en m ³ /s	Apports autres que les cours d'eaux en m ³ /s	Pertes lors du passage dans la zone d'étude en m ³ /s
Janvier	21.277	21.133		
Février	19.970	20.567	0.597	
Mars	23.750	24.633	0.883	
Avril	40.903	46.167	5.263	
Mai	21.187	26.073	4.887	
Juin	4.080	2.583		1.497
Juillet	1.408	0.670		0.738
Août	1.172	0.540		0.632
Septembre	1.213	0.310		0.903
Octobre	5.177	3.293		1.883
Novembre	14.577	14.533		
Décembre	19.250	19.967		

Tableau 14: Comparaison des écoulements en amont et aval du réseau hydrographique dans la zone d'étude à partir des débits moyens mensuels

On remarque que la somme des débits des cours d'eau en amont du bassin se rapproche globalement du débit mesuré en aval, avec cependant des différences observées pour des périodes caractéristiques telles que la période des pluies et de fonte des neiges et la période d'été.

Cette comparaison permet de dissocier les différentes participations à l'écoulement à l'exutoire. Les débits mesurés en amont aux limites de la zone d'étude représentent à la fois la part des eaux s'écoulant en surface ainsi que la part des eaux qui s'infiltrent à partir des cours d'eaux et canaux. Les eaux souterraines entrant dans la zone d'étude ainsi que les pluies efficaces peuvent être estimées. Si on soustrait toutes ces participations à l'écoulement à l'exutoire la valeur obtenue peut représenter la participation à l'écoulement liée à la fonte des neiges présentes dans la zone d'étude.

Les débits en aval sont supérieurs au cumul des débits amont pour les mois de Février, Mars, Avril et Mai. Ceci se traduit par un apport de $30,39 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (avec un débit moyen de $2,908 \text{ m}^3/\text{s}$ appliqué à 121 jours). On remarque que celui-ci est surtout très important pour les mois d'Avril et de Mai qui correspondent aux plus fortes pluies et à la période probable de fonte des neiges. Par soustraction des autres flux connus (estimations des flux souterrains et des pluies entrants ou tombant dans la zone d'étude) on obtient une valeur restante de $10,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ qui peut

être considérée comme une **première estimation des apports de versants dans la zone d'étude** pour cette **période** soit surtout pour les mois **Avril et Mai, soit 36 mm/m²**. Cette valeur représente un apport d'eau disponible dans la zone, celui-ci peut s'infiltrer dans le sol, mais aussi ruisseler et rejoindre le réseau hydrographique. Il est donc difficile de déterminer quelle part de ce volume pourrait participer à la recharge du système aquifère.

Les débits en aval sont inférieurs au cumul des débits amont pour les mois de Juin, Juillet, Août, Septembre et Octobre. Ceci correspond à une **perte de 14,85*10⁶ m³** (débit moyen de 2,908 m³/s, 152 jours) **lors du passage dans la zone d'étude**. Or ces mois correspondent à la période d'irrigation et aux plus fortes valeurs d'évapotranspiration potentielle. Cette valeur, si elle ne permet pas de quantifier la part de chacune de ces deux composantes peut cependant être considérée comme une **première estimation des pertes par évaporation et prélèvements pour l'irrigation dans la zone d'étude entre Juin et Octobre, soit 51mm/m²**.

3.2.3.2.4 Caractérisation du fonctionnement du réservoir

Le taux de renouvellement du réservoir correspond à l'alimentation moyenne par rapport à la réserve totale moyenne. La durée de renouvellement est la durée nécessaire pour que le volume d'eau cumulé des recharges annuelles corresponde à la réserve totale. La réserve totale moyenne correspond à l'eau gravitaire stockée dans l'aquifère et peut être calculée à partir de la porosité efficace n_e et du dimensionnement du réservoir. Une seule valeur de porosité de 7,5% est disponible (réf 3) son origine n'étant pas fournie, plusieurs estimations peuvent être faites avec différentes valeurs et on obtient :

Epaisseur en m	Porosité efficace		
	0.075	0.1	0.13
20	429.00	572	743.6
30	643.50	858	1115.4
40	858.00	1144	1487.2
50	1072.50	1430	1859

Tableau 15: Evaluation de la réserve totale en fonction de différentes valeurs de porosité efficace et d'épaisseurs.

L'alimentation moyenne, soit la recharge annuelle disponible pour le système délimité dans cette étude est évaluée à partir du bilan à **76*10⁶ m³/an** soit **262 mm/m²/an** (11,6*10⁶ m³ pour les eaux souterraines ; 7,8*10⁶ m³ pour les pluies, 10,65*10⁶ m³ pour les apports de versants et 46,1*10⁶ m³ pour l'infiltration des cours d'eau), dans le cas de bonnes conditions d'infiltration soit 100% d'infiltration des eaux de fonte et de pluies. Elle est évaluée au minimum à **11,6*10⁶ m³/an** soit **40 mm/m²/an** si les conditions d'infiltrations sont moindres et si seules les eaux souterraines alimentent l'écoulement dans la zone

Recharge annuelle du système en 10 ⁶ m ³	Réserve totale en 10 ⁶ m ³				
	429	644	858	1144	1859
76	17.7	11.8	8.9	6.6	4.1
11.6	2.7	1.8	1.4	1.0	0.6

Tableau 16: Taux de renouvellement en % en fonction de différentes valeurs de réserve totale et d'alimentation

Recharge annuelle du système en 10^6 m^3	Réserve totale en 10^6 m^3				
	429	644	858	1144	1859
76	5.6	8.5	11.3	15.1	24.5
11.6	37.0	55.5	74.0	98.6	160.3

Tableau 17: Durée de renouvellement en années en fonction de différentes valeurs de réserve totale et d'alimentation

On remarque cette étude aurait été plus intéressante et pertinente si le système avait été considéré dans sa totalité, soit géologiquement délimité et non pas coupé à l'Ouest dans les vallées de Paghman et Kaboul.

3.2.3.2.2.5 Réflexion sur les variations du niveau piézométrique

Baisse du niveau piézométrique

La baisse du niveau piézométrique observée en 40 ans correspond à un déficit dans le bilan hydrogéologique. La variation de stock correspondante peut être estimée à partir d'une valeur porosité efficace et du volume idéalisé de la tranche de réservoir mise en jeu (cf § 3.2.3.2.1.3). Elle peut s'expliquer par différents facteurs et notamment une augmentation des prélèvements liés aux activités humaines et peut être aussi par un déficit de recharge.

On remarque cependant que l'accroissement de la population entraîne inévitablement une forte augmentation des prélèvements dont le volume peut être assez facilement estimé (cf § 3.2.3.2.1.2). On peut considérer que la sécheresse de ces dernières années, si elle affecte la recharge, ne fait sûrement qu'amplifier le déficit du bilan. En négligeant l'effet de la sécheresse et en ne considérant que l'impact causé par l'homme, le nombre d'années nécessaires à des baisses du niveau piézométrique peut être déterminé.

Pour cela il faut que les prélèvements pris en compte représentent l'écart entre le régime actuel et celui des années 60 pour lequel le système est considéré comme stable ; il faut donc soustraire la part des prélèvements estimés en 1962. N'ayant dans les deux cas pas de données précises pour estimer les prélèvements dus à l'irrigation et à l'industrie, les calculs suivants sont effectués uniquement à partir des estimations des prélèvements destinés aux besoins quotidiens de la population en prenant une consommation moyenne de base de 60L/j/hab pour 1,5 ; 3 et 3,5 millions d'habitants :

Avec une porosité efficace de 7,5%	Prélèvements en $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 7m	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 10m
1500000	25.84	5.8	8.3
3000000	58.69	2.6	3.7
3500000	69.64	2.2	3.1
Avec une porosité efficace de 13%	Prélèvements en $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 7m	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 10m
1500000	25.84	10.1	14.4
3000000	58.69	4.4	6.3
3500000	69.64	3.7	5.3

Tableau 18: Nombre d'années nécessaires pour entraîner des baisses de 7 et 10 mètres du niveau piézométrique en fonction de l'augmentation des besoins en eau de la population.

Sans considérer les autres prélèvements possibles et les effets de la sécheresse, on constate que les niveaux baissent assez rapidement. Cela pourrait signifier que la valeur de

porosité efficace est trop faible et/ou que les prélèvements sont sur-estimés. Avec des besoins en eau moins importants soit une consommation moyenne de base de 40L/j/hab on obtient les valeurs suivantes :

Avec une porosité efficace de 7,5%	Prélèvements en $10^6\text{m}^3/\text{an}$	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 7m	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 10m
1500000	17.23	8.7	12.5
3000000	39.13	3.8	5.5
3500000	46.43	3.2	4.6
Avec une porosité efficace de 13%	Prélèvements en $10^6\text{m}^3/\text{an}$	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 7m	Nombre d'années nécessaires pour une baisse de 10m
1500000	17.23	15.1	21.6
3000000	39.13	6.7	9.5
3500000	46.43	5.6	8.0

Tableau 19: Nombre d'années nécessaires pour entraîner des baisses de 7 et 10 mètres du niveau piézométrique en fonction de l'augmentation des besoins en eau de la population.

Ces calculs ne suffisent pas à expliquer la baisse du niveau piézométrique dans la région de Kaboul. Des simulations réalisées en régime transitoire avec le modèle numérique, en faisant varier les différents facteurs qui peuvent être la cause de cette baisse, permettront d'envisager plusieurs scénarios possibles et d'observer les résultats.

Cependant on remarque également qu'en idéalisant les tranches de réservoirs et en considérant que le système aquifère s'étend dans toute la zone d'étude on s'éloigne sûrement de la réalité et ces volumes risquent d'être surestimés.

Battement de la nappe

La porosité efficace du réservoir est sûrement hétérogène suivant ses couches constitutives et suivant la profondeur. L'étude du battement de la nappe permet d'évaluer la porosité de la zone supérieure de l'aquifère soit à priori de la couche de limons et la recharge possible lors de la période de haute eaux. Les variations observées dépendent de deux paramètres, la porosité efficace de la tranche de réservoir mise en jeu et le volume d'eau pouvant être contenu dans cette tranche. En faisant plusieurs hypothèses sur la recharge possible lors de la période des hautes eaux, plusieurs valeurs de porosité peuvent expliquer l'élévation du niveau piézométrique observé, ou si on procède au raisonnement inverse on peut en considérant plusieurs porosités essayer d'estimer la recharge. Ces deux paramètres bien qu'inconnus doivent néanmoins s'accorder pour expliquer les variations de niveaux piézométriques observées. Actuellement, des équipements de mesure en continu du niveau piézométrique sont mis en place à Kaboul par le BGR, DACAAR et sûrement d'autres organismes.

Δh en m	Porosité efficace		
	0.075	0.1	0.13
1	21.45	28.60	37.18
2	42.90	57.20	74.36

Tableau 20: Variation de stock en million de mètres cube en fonction des variations piézométrique et de la porosité efficace.

Dans les rapports disponibles la variation annuelle du niveau piézométrique est de l'ordre de 1 à 2 m voire 5 m (cette valeur est assez élevée pour un battement de nappe mais peut être probable proche d'un cours d'eau infiltrant par exemple). Nous avons récemment obtenu les données du suivi piézométrique hebdomadaire d'un ouvrage appartenant à l'ONG DACAAR (cf figure 23). Les mesures réalisées entre Octobre 2003 et Août 2005 révèlent un battement de l'ordre de 1m pour la période des hautes eaux ainsi qu'une baisse durable du niveau de l'ordre de 0,45 m en un an (*). Le battement serait le signe qu'une recharge a toujours lieu pour les eaux souterraines **en période des hautes eaux** et suivant la porosité efficace considérée cette **recharge** pourrait varier entre **21 et 37*10⁶ m³** (cf tableau 20).

Or la **recharge** disponible lors de la **période des hautes eaux, estimée** en ne considérant que l'apport des pluies et de la neige fondue lors de la période hivernale. Si on considère que 100% du volume disponible s'infiltré est de **18,6*10⁶ m³**. En considérant un apport supplémentaire lié aux infiltrations possibles à partir des rivières et à l'augmentation des flux souterrains entrants dans la zone, la recharge estimée se rapprocherait des valeurs obtenues par l'interprétation des variations observées. Cependant il faudra avoir plus d'informations sur les relations nappes rivières pendant cette période. Les études réalisées dans les années 60 sont peu précises et il est donc difficile d'apprécier ces relations ; bien que d'après les données, les cours d'eau seraient alimentés par les eaux souterraines en période hivernale, auquel cas ils ne participeraient pas à la recharge des eaux souterraines.

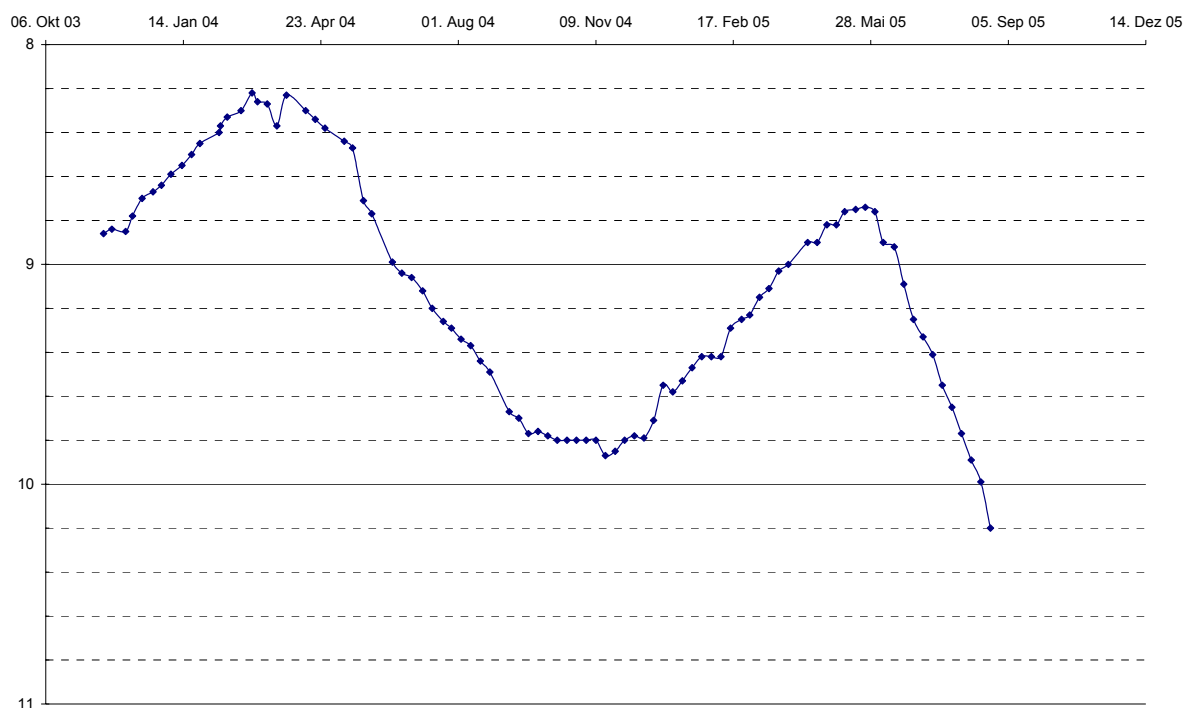


Figure 23 : Mesure de la profondeur du niveau piézométrique d'un ouvrage situé au Nord-Ouest de la plaine de Kaboul (34°33'10"N et 69°09'36"E)

Si cet enregistrement semble nous indiquer qu'actuellement une recharge de l'aquifère est possible. La baisse de 0,4m observée reflète par contre une baisse durable du niveau et même s'il ne s'agit que d'une mesure ponctuelle dans l'espace et le temps ne pouvant peut-être pas représenter l'état de tout le système, cette mesure pourrait être la preuve d'une surexploitation des eaux souterraines.

(*) Ce forage est soumis à des prélèvements quotidiens depuis le début des mesures. Les interprétations faites ne sont donc valables que si le régime d'exploitation est constant sur la période de mesure soit si l'effet de ces prélèvements peut être soustrait aux variations globales. Cependant aucune information n'est disponible concernant l'évolution du régime d'exploitation.

4 Partie technique

4.1 La construction du modèle

Les différentes étapes de la génération du modèle numérique correspondent à la méthode de construction à suivre avec le logiciel SPRING. Elles aident à définir les caractéristiques du modèle. Un modèle c'est:

- La définition d'un espace délimité pertinent ;
- Un maillage adapté au problème posé et aux objectifs de l'étude (taille des éléments, raffinement) ;
- Des propriétés internes caractérisant le système (valeur de perméabilité, transmissivité, porosité) ;
- Des conditions aux limites géologiques et hydrodynamiques, qui définissent les relations entre le système et l'extérieur et conditionnent donc les écoulements au sein du système (potentiels et flux imposés, conditions mixtes) ;
- Des conditions initiales, dans le cas d'un calcul en régime transitoire, soit l'ensemble des paramètres précédents caractérisant le système à un instant donné.

4.1.1 L'architecture du modèle

4.1.1.1 La délimitation de la zone étudiée

La zone d'étude est située entre les latitudes Nord 3812500 mètres et 3827500 m et entre les longitudes Est 510000 m et 539000 m. Le système de coordonnées associé est l'ellipsoïde WGS 84 (World Geodetic System 1984) et une projection UTM (Universal Transversal Mercator), la zone correspondant à l'Afghanistan étant la S42 dans l'hémisphère Nord

Les limites du modèle doivent être alignées, autant que possible, avec les limites hydrologiques et géologiques naturelles du système étudié. Elles sont réalisées en tenant compte de la géologie du bassin, ainsi que des informations et données disponibles et utilisables (cf annexe 19). L'étude des cartes papiers a conduit à choisir la ligne topographique égale à 1829m (6000 feet) comme base pour tracer le contour du modèle. Elle correspond aux pieds de versants des reliefs bordant le bassin (cf figure 24).

Les limites ainsi obtenues ne correspondent pas toutes à une limite naturelle. Les études des eaux souterraines et de surface réalisées dans ces secteurs nous permettront d'appliquer des conditions aux limites appropriées au niveau de ces limites afin de représenter l'effet net de la continuation du système au-delà du maillage ; sinon ceci peut entraîner des erreurs dans le comportement interne du système et les résultats obtenus peuvent être éloignés de la réalité.

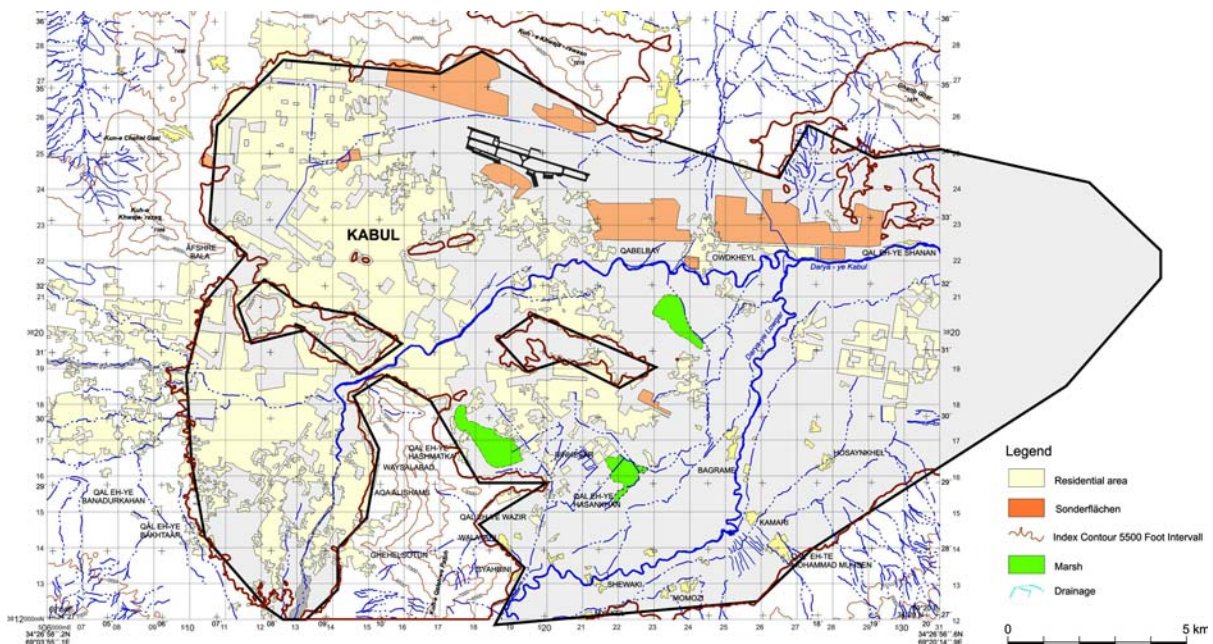


Figure 24 : Délimitation de la zone d'étude modélisée

Il s'agit à l'Ouest, dans le bassin de Darulaman, de la continuation des aquifères de Paghman et Kaboul et au Sud de celle du bassin de Logar.

Au Nord-Est, la ligne topographique 1829 m s'interrompt. La topographie relativement plate de la zone conduit à peu de renseignements sur les cartes et ne permet pas de définir précisément si cette zone doit être considérée comme une limite ouverte ou fermée. Dans un rapport de J.Pias et d'après G.Menessier (réf 4) le bassin perd une partie de ces eaux au niveau d'une zone au Nord qui correspondrait à d'anciens chenaux empruntés par les fleuves Kaboul et Logar. L'hypothèse d'un deuxième exutoire du bassin au nord de notre zone d'étude peut être faite. Le modèle est fermé dans cette zone mais une ouverture peut être prise en compte au niveau des conditions aux limites lors des simulations.

Enfin à l'Est, les limites ont été imaginées pour fermer le modèle faute de cartes suffisamment précises disponibles dans cette zone, sachant que les gorges de Tangi Gharu sont situés à environ une dizaine de kilomètres de la confluence Kaboul-Logar.

4.1.1.2

Les structures du modèle

Les objets linéaires ou polygonaux structurant l'espace de la zone d'étude tels que les limites du modèle, les cours d'eau, les puits, les zones de recharge, doivent être créés sous formes de « structures » dans le modèle numérique (cf figure 25). Ces différents objets ou zones doivent donc être identifiés au début de l'élaboration du modèle car ils conditionneront la construction du maillage et/ou la répartition des valeurs attribuées aux éléments et aux nœuds. Une fois le maillage terminé de nouvelles structures peuvent être créées pour faciliter l'entrée de nouveaux paramètres, cependant le maillage ne tiendra pas compte de l'existence de ces nouvelles structures à moins de le retravailler complètement ou localement.

La première question posée était de savoir comment ces premières informations sur l'architecture du modèle pouvaient être importées dans le programme XSUSI. Le menu « structure » du programme permet d'importer des données sous différents formats (csv, arc, shp). Des fichiers vectoriels géoréférencés (shp) ont été créés grâce au logiciel DIDGER à partir de cartes scannées, de photos satellites sur lesquelles figuraient les informations nécessaires à la création du modèle (altitude, cours d'eau, limites de l'étendue de la ville...) ou de données sous Excel pour les coordonnées de puits.

L'étude n'étant qu'une première approche dans la compréhension de l'hydrogéologie de Kaboul, le modèle numérique devait être une représentation valable de la réalité mais largement simplifiée. Aussi les différents objets de structures ont été tracés très grossièrement. De plus compte tenu de la taille minimale envisagée pour un élément, la longueur des segments d'un tracé ne devait pas être inférieure à 500 m (cf § 4.1.1.3 et 4.1.1.4).

Pour que les différents objets s'agencent correctement entre eux dans XSUSI, les cartes sur lesquelles ils figuraient ont été géoréférencées, afin que tous puisse être intégré au sein du programme dans un même système de coordonnées dont l'origine est (506000 ; 3812000). Finalement la zone d'étude s'étend sur environ 27 km de long et 16 km de large.

Dans le modèle les structures représentent les objets ou zones suivantes (cf annexe 20):

- Les structures linéaires
 - o Les aquifères limitrophes (2 en bordure);
 - o Les reliefs ceinturant le bassin (3 en bordure) ;
 - o La possibilité d'un exutoire vers le Nord (1 en bordure) ;
 - o Les cours d'eau (4 internes) ;
 - o Une portion du cours inférieur du Kaboul en tant qu'exutoire (1 interne) ;
- Les structures polygonales
 - o Les différentes zones d'épaisseur (4 internes) ;
 - o L'espace de liberté des cours d'eau (2 internes) ;
 - o La délimitation de la ville (1 interne) ;
- Les structures ponctuelles
 - o L'emplacement réel des puits ;
 - o Les nouveaux puits fusionnés utilisés dans le modèle.

4.1.1.3 Les contours

Si les structures sont des objets qui organisent l'espace et qui portent de l'information, les contours sont les objets utiles à l'élaboration du maillage. Ils constituent la trame de base essentielle à la génération des nœuds et donc des éléments finis. Ils peuvent être des objets linéaires comme les limites externes du modèle, les cours d'eau, ou ponctuels pour les puits ou les sources. Ils sont en général créés à l'aide des structures préexistantes par un découpage de celles-ci en segments élémentaires (cf figure 25). Ces segments peuvent ensuite être eux-mêmes découpés suivant des critères à définir dans le menu « contour » du programme. La génération des nœuds du modèle est basée sur ce découpage.

La distance minimale inter-noeuds doit être définie suivant le degré de complexité du modèle souhaité. Plus cette distance sera petite, plus le nombre d'éléments sera important. La finesse du maillage améliore la précision des résultats, d'un autre côté elle rallonge le temps de calcul des simulations. La surface des éléments dépend aussi de l'échelle à laquelle on souhaite travailler. Si nous voulons décomposer notre zone d'étude en un nombre de l'ordre de 1000 à 1500 éléments pour éviter des temps de calcul trop longs, la surface de notre modèle étant de 282 km² environ, on peut prendre une distance inter-noeuds de 500 m ; un élément représente alors 0,25 km² et le nombre d'éléments est de 1128. Le nombre d'éléments sera augmenté ultérieurement par un raffinement effectué au niveau des puits.

Afin d'éviter des problèmes lors de la génération du maillage, les menus « contour » et « géométrie » comportent des options permettant d'effectuer un contrôle des objets créés. Une vérification de la distance minimum entre les points de contours permet d'éviter des superpositions ou rapprochements trop importants. Un contrôle a été fait jusqu'à 200 m de distance et les points appartenant à des structures différentes n'ont pas été regroupés.

Enfin l'option « optimisation » génère un contour extérieur fermé permettant la création ultérieure des nœuds aux frontières.

4.1.1.4 Le maillage

Les nœuds et les éléments sont générés par le programme. La réalisation du maillage nécessite plusieurs étapes à travers lesquelles les caractéristiques telles que la forme des éléments ou les zones à raffiner sont définies grâce à différentes options du menu « géométrie » de XSUSI.

Pour générer les nœuds il faut d'abord créer une amorce autour des structures (option générer les nœuds aux limites). Ensuite d'autres options permettent de créer des nœuds dans l'ensemble de la zone du modèle (cf figure 25). Cependant, il est parfois utile et nécessaire de retravailler la disposition manuellement en créant, déplaçant ou supprimant certains nœuds afin d'atteindre une disposition optimale.

Le maillage aux éléments finis a ensuite été créé à l'aide triangles et de quadrilatères. Plusieurs options permettent ensuite de vérifier et d'améliorer le maillage mais il faut aussi retravailler manuellement certaines zones. Le rapport entre les différents côtés des éléments doit être le plus proche possible de un. En effet des éléments linéaires longs doivent être évités car ils peuvent conduire à des instabilités numériques et des erreurs.

Le raffinement du maillage est soit pris en compte lors de la génération des nœuds en créant des zones plus denses de nœuds, soit en retravaillant globalement ou localement le maillage ultérieurement auquel cas lors de chaque commande d'un raffinement, le programme divise chaque élément en quatre autres éléments. Un raffinement postérieur au maillage est effectué dans la périphérie proche des puits du modèle. Finalement le modèle est constitué de 2110 nœuds et 2396 éléments.

Une fois l'architecture du modèle mise en place, il faut entrer les principaux paramètres qui seront affectés soit aux nœuds soit aux éléments à l'aide de fonctions.

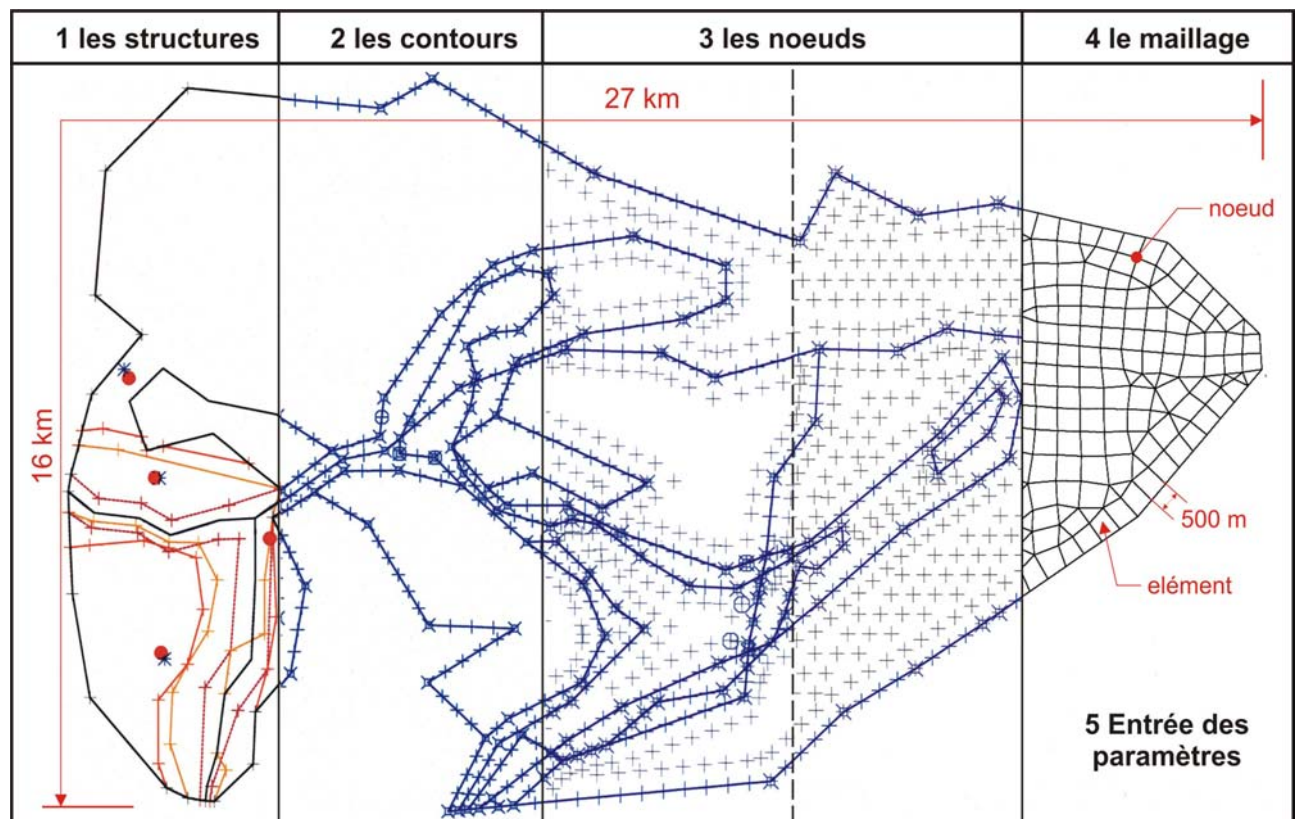


Figure 25 : Les différentes étapes de la réalisation du modèle numérique

4.1.2 Les propriétés du modèle

4.1.2.1 Propriétés internes

N'ayant pas suffisamment d'informations en ce qui concerne la répartition spatiale des valeurs de perméabilité et de porosité, une seule valeur est appliquée à tout le modèle pour ces paramètres.

La valeur de perméabilité s'applique aux éléments grâce à la fonction KWER (cf annexe 21). La valeur moyenne des trois aquifères est de $3,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, cependant les valeurs utilisées sont associées à des profils et ne sont donc peut-être pas du tout représentatives de la totalité du système aquifère. Différentes valeurs pourront être testées.

Pour la porosité la fonction PORO (cf annexe 21) est utilisée pour appliquer la valeur au niveau des nœuds. Différentes valeurs pourront être testées.

Même si notre modèle n'est qu'en 2D, la troisième dimension peut être approchée en prenant en compte la valeur de la transmissivité T ($T=K \cdot e$, où K est le coefficient de perméabilité et e l'épaisseur de la zone saturée). Entre 1965 et 1967, une campagne de géophysique utilisant la méthode du sondage électrique a permis d'identifier des zones de différentes épaisseurs (réf 3). La fonction MAEC associée à des structures polygonales permet d'affecter et de changer rapidement des valeurs d'épaisseur en mètres dans notre modèle (cf annexe 22). La valeur de transmissivité calculée dépend de la répartition des paramètres épaisseurs et perméabilité.

4.1.2.2 Conditions aux limites

Elles sont indispensables car elles représentent l'interaction entre le système et l'extérieur.

4.1.2.2.1 Les limites à flux imposés

4.1.2.2.1.1 Les bordures du modèle

Les flux entrants pour les aquifères peuvent être pris en compte aux limites par les fonctions KNOT ou RAND (cf annexe 21). Cependant en régime transitoire seule KNOT peut être utilisée c'est pourquoi on choisit d'utiliser cette fonction quelque soit le régime. Elle permet d'appliquer à chaque nœud un volume en m^3/UT (Unité de Temps) entrant ou sortant (la valeur attribuée est alors négative). En associant la fonction au signe / dans le fichier text, un volume total en m^3/UT peut être distribué entre les différents nœuds d'une liste associée à une structure ou à une zone identifiée (cf annexe 23).

Les autres limites, les zones montagneuses Nord, Sud-Ouest et Sud-Est, peuvent être ou non associées à des fonctions suivant les simulations. Si aucune condition particulière n'est affectée, le programme considère ces bordures comme limites imperméables. En affectant un potentiel en mètre avec la fonction POTE (cf annexe 21), on crée un front d'alimentation sans limites et il faut dans ce cas appliquer une deuxième fonction, MXKI pour limiter les volumes d'eau entrants. Pour les simulations qui ont été réalisées, la fonction KNOT a été utilisée pour générer un apport d'eau contrôlé et simuler une recharge par ruissellement et infiltration des eaux en provenance des reliefs (pluie et neige fondue).

4.1.2.2.1.2 Infiltration efficace

Pour la recharge par infiltration des eaux de pluie, les valeurs peuvent être appliquées à tout le modèle ou à des zones particulières comme le long des cours d'eaux où la couche de limons est supposée absente ou encore dans la zone non urbaine si on considère que plus de surfaces perméables sont disponibles dans cette zone. La fonction FLAE (cf annexe 21) associée au signe * dans le fichier texte permet d'affecter un volume d'eau en $m^3/m^2/UT$ aux éléments.

4.1.2.2.1.3 Prélèvements

Comme quelques données concernant des ouvrages de prélèvement étaient disponibles, des puits ont été créés. Il s'agissait alors surtout d'effectuer la démarche de prise en compte de puits dans le modèle. Les valeurs de prélèvements disponibles sont les débits des essais de pompage, et leur prise en compte suppose alors que le régime de fonctionnement de ces ouvrages à l'époque devait être du même ordre de grandeur. En tenant compte le fait que la zone a connu plusieurs décennies de guerres, il semble évident que ces puits créés entre 1960 et 80 ne fonctionnent peut être plus aujourd'hui ou ont en tout cas des régimes de fonctionnement différents. Les puits seront donc juste utilisés pour les simulations de l'état des années 60-80. Seuls les ouvrages les plus importants ont été sélectionnés pour simuler les prélèvements. La valeur seuil a été arbitrairement choisie à 25 L/s. Les puits figurent dans le modèle en tant que structures et la fonction KNOT est utilisée. Les valeurs de prélèvements utilisées sont les estimations faites à partir du calcul des besoins en eau de la population (cf § 3.2.3.2.1.2).

Pour simuler les prélèvements au cours des années 80-90 et la situation actuelle, une zone représentant l'étendue de la ville est créée à partir d'une carte de 2002 (cf annexe 8) et associée à la fonction KNOT. En effet, étant donné les milliers de points de prélèvements dans la zone et le manque de données suffisamment précises pour représenter des zones de prélèvements plus importantes que d'autres, les pertes sont simulées au niveau de toute la surface de la zone urbaine (cf annexe 23)

4.1.2.2.2 Les limites à potentiels imposés

4.1.2.2.2.1 Les cours d'eaux

Ils ne sont pris en compte dans le modèle que par le fait que des processus d'apport par infiltration et de perte par exfiltration sont possibles au niveau des tracés les représentant. Les dimensions des lits sont estimées à environ 15 m par 2-3 m à partir des photos (cf figure 12). L'échelle du modèle numérique est telle que 15 m sont infiniment petits et les relations nappes-rivières peuvent donc être modélisées au niveau des structures linéaires « cours d'eau ».

Un potentiel en mètre est affecté à certains nœuds avec la fonction VORF (cf annexe 21). A partir de quelques valeurs le programme peut effectuer des interpolations et extrapolations (plus hasardeuses). Les valeurs utilisées dans le modèle sont pour les extrémités amont 1829 m pour le Kaboul et pour le Paghman et 1802 m pour le Logar ; pour l'extrémité aval du fleuve Kaboul on prend la valeur affectée à la station de jaugeage Tangi Gharu soit 1770 m. Pour améliorer l'interpolation à l'intérieur du modèle, d'autres valeurs ont été utilisées. Elles sont évaluées grâce au logiciel GoogleEarth qui a permis une navigation le long des cours d'eau par photo satellite. Aucune valeur ponctuelle n'a été utilisée mais l'observation des variations altitudinales a permis une meilleure appréciation des pentes dans la zone. Le suivi a été réalisé de l'amont vers l'aval et dès lors qu'une baisse de niveau de 10 m était atteinte, une valeur était intégrée au modèle (cf figure 26).

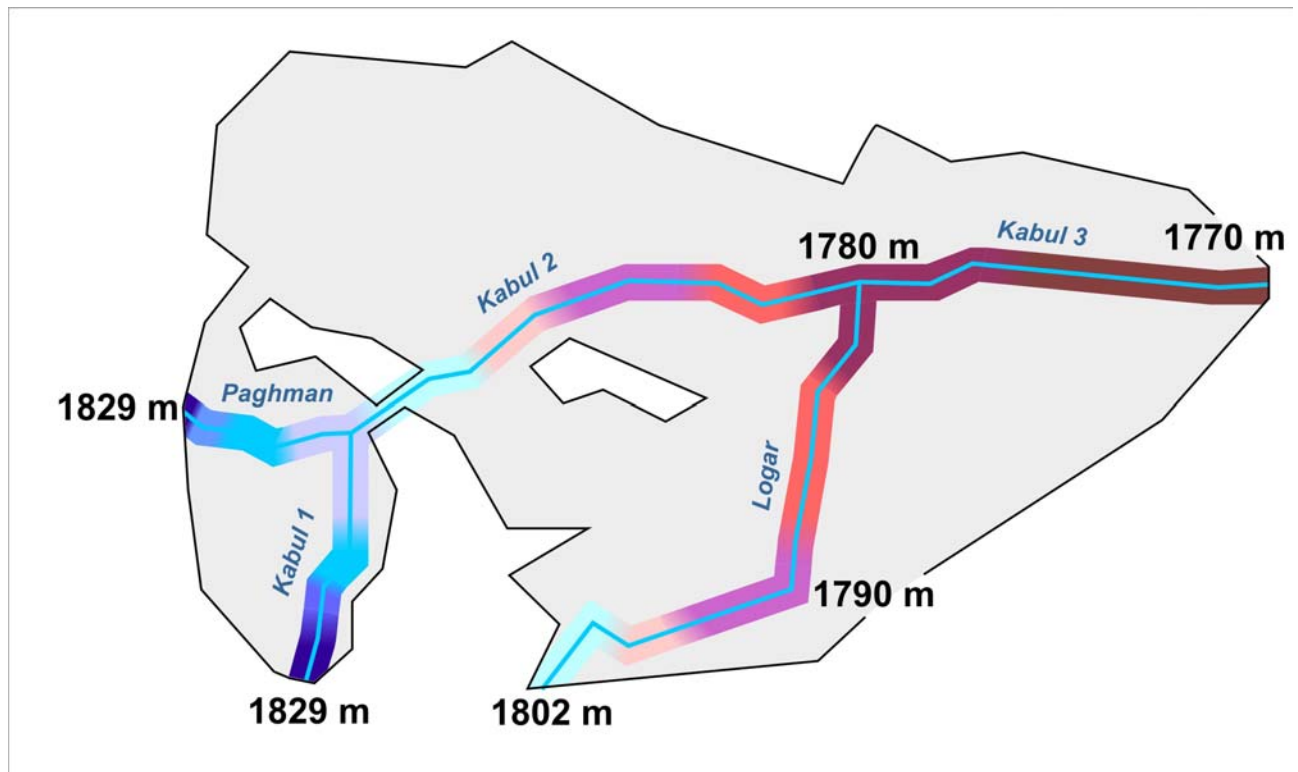


Figure 26 : Interpolation des niveaux topographiques du lit des cours d'eau à partir de données ponctuelles

La direction et le taux d'écoulement sont définis grâce à la fonction LERA (cf annexe 21) dont la valeur est équivalente à un coefficient de drainance.

LERA [m/UT] = $\alpha \cdot b$ avec b la largeur en m du lit du cours d'eau

et α [s-1] = K_f/d où d est l'épaisseur du lit du cours d'eau et K_f un coefficient de perméabilité en m/UT

En travaillant au pas de temps mensuel, et si on prend $K_f = 0,0005\text{m/s} = 1296\text{m/mois}$, $d=0,2\text{m}$ et $b=15\text{m}$

On obtient $\text{LERA} = 15 \cdot 1296 / 0,2 = 97200$

Le débit d'infiltration ou d'exfiltration dépend alors de la relation linéaire entre la différence de potentiel existante entre les deux niveaux d'eau souterraine et cours d'eau (niveau supérieur de la tranche d'eau) et le coefficient de drainance. Suivant les potentiels calculés par le programme lors des simulations pour les eaux souterraines et ceux affectés au cours d'eau, il y a infiltration ou exfiltration (cf figure 27).

$$Q \text{ [m}^3\text{/s]} = Kai$$

$$\text{avec } K = K_f/d = \alpha \text{ [s-1]} \quad A \text{ [m}^2\text{]} = b \cdot l$$

où l est la distance en m calculée par DADIA comme étant la somme des demi-distances séparant un nœud de ses voisins.

En remplaçant on a :

$$Q = \alpha \cdot b \cdot l \cdot i$$

$$\text{soit } \text{LERA} = \alpha \cdot b \quad \text{on a} \quad Q = \text{LERA} \cdot l \cdot i$$

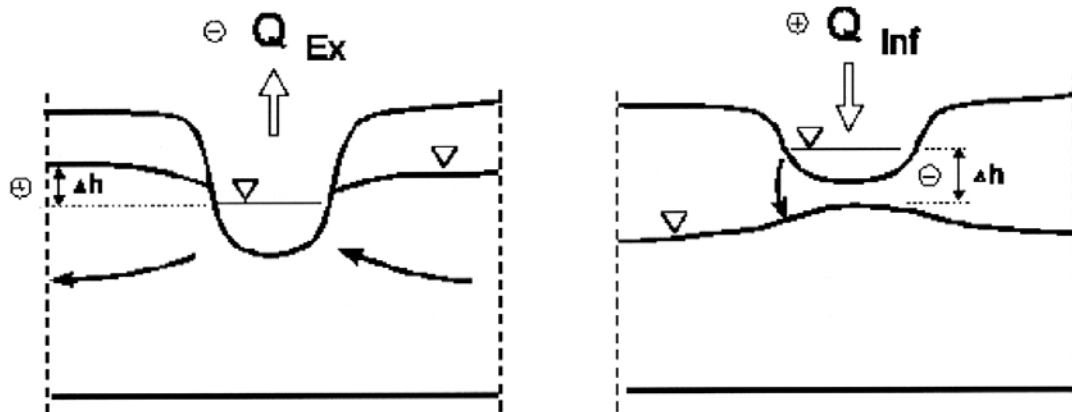


Figure 27: Echange entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Pour éviter des échanges de volumes d'eau infinis on utilise les fonctions MKXI et MXKE (cf annexe 21) qui permettent de définir des taux maximaux d'infiltration ou d'exfiltration au niveau de structures linéaires ; l'unité doit être définie en $\text{m}^3/\text{m}/\text{UT}$. Les valeurs estimées à partir des études des années 62-63 peuvent être utilisées pour l'infiltration (cf § 3.2.3.2.1.1).

En revanche, il est difficile de déterminer une valeur pour limiter l'exfiltration dans les cours d'eau.

4.1.2.2.3 Exutoire

Pour modéliser l'exutoire, un potentiel imposé peut être fixé au niveau des nœuds en bordures Est du modèle avec la fonction POTE (2 nœuds). Sinon, une partie du cours inférieur du Kaboul en aval de la confluence Logar-Kaboul est également observée en tant qu'exutoire du bassin. Les valeurs d'exfiltration ne seront pas limitées dans cette zone.

Dans notre modèle numérique, les débits des cours d'eau ne sont pas directement pris en compte, les débits sortants à l'exutoire ne doivent pas être comparés à l'écoulement mesuré à Tangi Gharu car ils correspondent à des volumes sortant du système aquifère. Il est difficile d'évaluer la participation possible des eaux souterraines à l'écoulement à l'exutoire, cependant une estimation peut être faite à partir de l'équation du bilan hydrologique (cf § 0) ce qui donne en $\cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$:

$$474 \text{ Ecoulement à Tangi Gharu} - 457 \text{ Part des cours d'eau} = 17 \text{ Part possible des eaux souterraines (eaux souterraines} \\ + \text{ pluies efficaces et eaux de fonte des neiges dans la zone} \\ \text{ d'étude)}$$

On remarque qu'il est toujours indispensable qu'au moins un nœud du modèle ait une valeur de potentiel ou de flux imposé pour les conditions aux limites afin que le programme puisse entreprendre le calcul des isopièzes. Une extrapolation est ainsi effectuée à partir de ce point à l'ensemble du modèle. Les fonctions POTE, RAND et KNOT ne sont pas cumulables.

4.1.3 Limites du modèle

4.1.3.1 Contraintes engendrées par la simplification du modèle

Le principal problème engendré par la simplification du modèle est que celui-ci s'éloigne de la réalité bien plus complexe. Ses réactions aux simulations dépendent de la façon dont les paramètres sont pris en compte et distribués dans l'espace, suivant les valeurs affectées aux flux et aux propriétés du système. Or les propriétés internes sont largement simplifiées dans notre cas.

Les tracés représentant les bordures externes du modèle, les cours d'eau et les différentes zones où peuvent être simulés une recharge ou une perte ont été effectués de manière grossière et donc approximative. Lorsque ces objets sont associés à des conditions aux limites de types flux nul ou de flux imposé, la simplification au niveau du tracé n'engendre pas d'erreur majeure sur les flux résultants puisque ceux-ci sont définis. En revanche si les tracés sont associés à des conditions aux limites de type potentiel imposé comme POTE et VORF ou si ils délimitent des surfaces de recharge ou d'évaporation, l'approximation du tracé peut signifier une sur ou une sous-estimation des limites et surfaces d'échanges et entraîner des erreurs au niveau des flux calculés par le modèle dans ces zones.

Les apports dus à la fonte des neiges sont représentés au niveau des limites externes du modèle de manière identique en tout point. Cependant dans la réalité, suivant l'altitude, l'exposition et la pente des versants, ces apports peuvent être variables dans l'espace et le temps.

Le modèle est en deux dimensions et le système aquifère est considéré comme libre. Cependant pour que le comportement du système soit plus réaliste il aurait été préférable de modéliser la surface du sol grâce à la fonction GELA (cf annexe 21). Faute de données cette étape n'est pas encore possible. De même la couche de silts présente en surface, suivant ses caractéristiques (épaisseurs, composition, perméabilité) pourrait peut-être agir dans certaines zones comme une limite imperméable et créer des conditions captives ou semi-captives. Une couche imperméable pourrait être définie avec la fonction UNDU (cf annexe 21), mais les données actuelles ne permettent pas encore de connaître, d'évaluer et de modéliser l'effet de la couche de silts sur le système aquifère.

4.1.3.2 Erreurs de conception

La courbe topographique 1829 m ayant été utilisée pour construire les contours du modèle, un relief interne (relief interne Est) a été créé et dès lors considéré comme obstacle à l'écoulement des eaux souterraines. Cependant une coupe géologique Est Ouest dans la plaine où figure un relief interne indique que celui-ci est constitué de loess encroûté reposant sur des sables et des grès (cf annexe 25). Si le relief présent sur la coupe est bien celui représenté dans le modèle alors cette zone n'agit peut-être pas comme une limite imperméable. Auquel cas nous aurions créé dans notre modèle une barrière à l'écoulement d'environ 4 km de long et 1 km de large n'ayant pas lieu d'être, ce qui peut avoir des effets non négligeables sur le comportement de l'écoulement dans cette zone qui par répercussions pourrait aussi affecter d'autres zones du modèle.

La délimitation du modèle a été effectuée trop rapidement et les limites Ouest auraient pu être directement ajustées au niveau des profils disponibles des aquifères de Kaboul et de Paghman (cf annexe 19).

Si des coordonnées exactes étaient disponibles pour les puits, ceux-ci ont été importés dans le modèle une fois le maillage terminé. Par simplicité le maillage n'a pas été recréé et les puits ont été affectés aux nœuds les plus proches. Leur localisation comporte donc une erreur inférieure à 500 m. Dans le cas où la localisation d'objets doit être exacte il est préférable et plus simple d'intégrer ces objets dès le départ dans le modèle avant la construction du maillage. Sinon pour que chaque nouvel objet soit intégré au maillage il faut retravailler celui-ci localement.

4.2 Simulations

Les données disponibles sont peu nombreuses et de qualité parfois douteuse, ainsi toutes les valeurs calculées qui en découlent ne sont que des estimations possibles des valeurs réelles. L'avantage de tester ces différentes estimations avec un modèle numérique est de pouvoir observer leur influence sur le comportement du système aquifère, grâce à la visualisation des isopièzes. Le modèle est une représentation largement simplifiée de la réalité ce qui veut dire que ses résultats ne sont pas d'une grande qualité. Cependant en tenant compte des informations disponibles sur le bassin de Kaboul il est possible d'avoir une idée des processus probables ou non et cette approche permet alors d'écarter les résultats trop improbables.

Les représentations du système obtenues avec les valeurs calculées et estimées à partir des données des années 60-70 devraient s'approcher du fonctionnement du système pour cette période. Ceci permet d'observer son comportement « naturel » (lorsque les prélèvements étaient moindres).

4.2.1 Principe

Les simulations peuvent être effectuées en régime permanent et en régime transitoire. Il s'agit de faire varier les valeurs entrées dans le modèle et d'observer les résultats obtenus à la fin de la simulation pour le régime permanent et à différents pas de temps pour une simulation en régime transitoire. Pour cela il faut connaître la distribution spatiale et temporelle (pour le transitoire) des variables et faire changer les valeurs en se basant sur différents scénarios possibles. Ces derniers doivent être choisis de façon à ce que les résultats observés permettent de valider ou d'écarter des hypothèses et apportent de nouvelles informations.

En régime permanent, l'échelle de temps à laquelle on travaille n'est pas importante car les résultats observés en fin de simulation sont ceux représentatifs d'un équilibre atteint par le système. Des valeurs mensuelles moyennes standards ont été utilisées (cf annexe 4). Un seul résultat est observé et considéré comme représentatif de l'état stationnaire du système pour un jeu de données entrantes. Les principaux paramètres variables sont la perméabilité et l'épaisseur du système aquifère ainsi que les conditions aux limites.

En régime transitoire, le principe est le même sauf que les valeurs changent au cours du temps. Il faut utiliser un état stationnaire obtenu lors d'une simulation en régime permanent pour représenter les conditions initiales du système avant de lancer la simulation en régime transitoire. Pour effectuer les calculs, le module de calcul SITRA utilise en plus du fichier texte propre au modèle, un deuxième fichier texte définissant pour chaque paramètre concerné les valeurs qui changent au cours du temps lors d'une simulation. Ce fichier, utilisé comme donnée de base pour le calcul, est indispensable en régime transitoire. Sa construction particulière nécessite une grande attention car la moindre erreur bloque le calcul. Pour chaque paramètre considéré, chaque nœud ou élément doit se voir attribuer une valeur, contrairement au fichier texte normal où les valeurs peuvent être attribuées à des groupes d'objets (cf annexe 24). Le logiciel est capable d'effectuer des interpolations des valeurs entre les pas de temps renseignés. Il faudra rentrer plus de données pour les périodes de changements importants pour que les résultats soient plus précis.

4.2.2 Méthode d'interprétation des résultats

Une simulation permet d'observer le comportement hydrodynamique à l'intérieur du modèle et de mettre en évidence les phénomènes caractérisant les échanges avec l'extérieur (infiltration et exfiltration). Ceci grâce à l'observation de l'orientation, de la forme et de l'espacement des isopièzes, qui nous renseignent sur les sens d'écoulement et la facilité ou difficulté de l'écoulement. D'autre part, les valeurs de potentiels obtenues ainsi que les sens d'écoulement, suivant leur probabilité d'existence permettent d'évaluer le degré de viabilité des résultats obtenus.

La surface du sol n'est pas modélisée mais nous avons un potentiel précis pour la station de jaugeage Tangi Gharu. De même les limites du modèle ont été effectuées en se référant à la ligne topographique 1829 m correspondant aux bordures du bassin. Bien que la topographie de la plaine de Kaboul ne soit pas directement connue, les quelques mesures au Trimble GPS et la navigation dans la zone grâce au programme Google Earth permettent de l'estimer en tout point. On peut donc écarter certains résultats de simulations en se basant sur ces estimations et en considérant que les niveaux piézométriques ne peuvent être plus élevés que la surface du sol, ils ne doivent pas non plus être trop profonds puisque les niveaux observés dans les années 60 étaient de l'ordre de quelques mètres de profondeur. En particulier dans le bassin de Darulaman ils ne doivent pas être supérieurs à 1830 m mais peuvent être de l'ordre de -10 m voir plus (cf § 3.2.2.6.3) ; dans la plaine ils ne devraient pas être supérieurs à 1800 m à l'Ouest et à 1780 m à l'Est et pas en dessous de 10 m de profondeur car les niveaux observés sur le terrain sont de l'ordre de 2 à 5-6 m de profondeur; en aval de la zone d'étude ils devraient être aux alentours de 1770 m car les eaux souterraines sont normalement censées s'accumuler en surface dans cette zone et s'exfiltrer pour sortir du bassin par les gorges de Tangi Gharu.

Lors de chaque modélisation le programme SITRA fournit un fichier détaillé des calculs. Le bilan est calculé au niveau des zones où figurent des coefficients de drainance, et les zones d'infiltration et d'exfiltration peuvent être visualisées. Une fonction BILK (cf annexe 21) associée à des structures du modèle permet également d'obtenir un calcul détaillé des flux entrants et sortants au niveau de chaque nœud. Enfin le bilan total est calculé ; ceci est surtout utile en régime transitoire car en régime permanent les entrées et les sorties doivent s'équilibrer.

Le taux d'écoulement à l'exutoire ne doit pas être comparé à l'écoulement à Tangi Gharu qui représente l'ensemble des eaux de surface et des eaux souterraines, mais seulement à une partie représentant les eaux souterraines (cf § 4.1.2.2.3).

Cette partie de l'étude doit être réalisée avec organisation ; différents scénarios doivent être envisagés en ayant chaque fois pour objectif de tester une hypothèse ou une valeur ou de visualiser un comportement. Le régime et l'échelle de temps à laquelle le travail est effectué doivent être clairement précisés et les valeurs entrantes correctement calculées. Le mois est l'échelle de temps minimum à laquelle on peut travailler tout simplement car les données disponibles n'ont pas une précision suffisante pour travailler à des pas de temps inférieurs. De plus le mois est l'échelle de travail la plus intéressante car elle permet d'identifier les différentes périodes importantes de l'année ayant une influence sur le fonctionnement du système, comme la période des pluies et de la fonte des neiges ou encore la saison sèche en été. Le pas de temps annuel ne permet pas d'observer le comportement du système mais plutôt son évolution au fil du temps lorsque celui-ci est soumis à une perturbation de longue durée.

4.2.3 Simulations en régime permanent : scénarii et résultats

Les principaux objectifs sont de faire varier la perméabilité, et de tester différents volumes de recharge possibles. On considère que la recharge maximale par les pluies et les eaux souterraines est connue grâce aux estimations faites (cf § 3.2.3.2.1.1) ; il s'agit donc surtout d'estimer la recharge due aux eaux de fonte des neiges. Les résultats observés sont principalement :

- la piézométrie générale dans la zone d'étude (valeurs et forme des isopièzes) ;
- le flux sortant à l'exutoire ;
- les flux d'infiltration et d'exfiltration au niveau des fleuves.

4.2.3.1 Observations en ne considérant que les flux souterrains entrants ($K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $e_{moy} = 40$ m)

La piézométrie observée varie entre 1829 m amont et 1770 m en aval, l'écoulement Ouest-Est présente un gradient hydraulique relativement constant de l'ordre de $3,5 \cdot 10^{-3}$ dans le bassin de Darulaman $1,4 \cdot 10^{-3}$ dans la plaine de Kaboul (cf figure 28). On remarque que ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles calculées à partir des isopièzes disponibles de 1963 (cf annexe 6a et 6b).

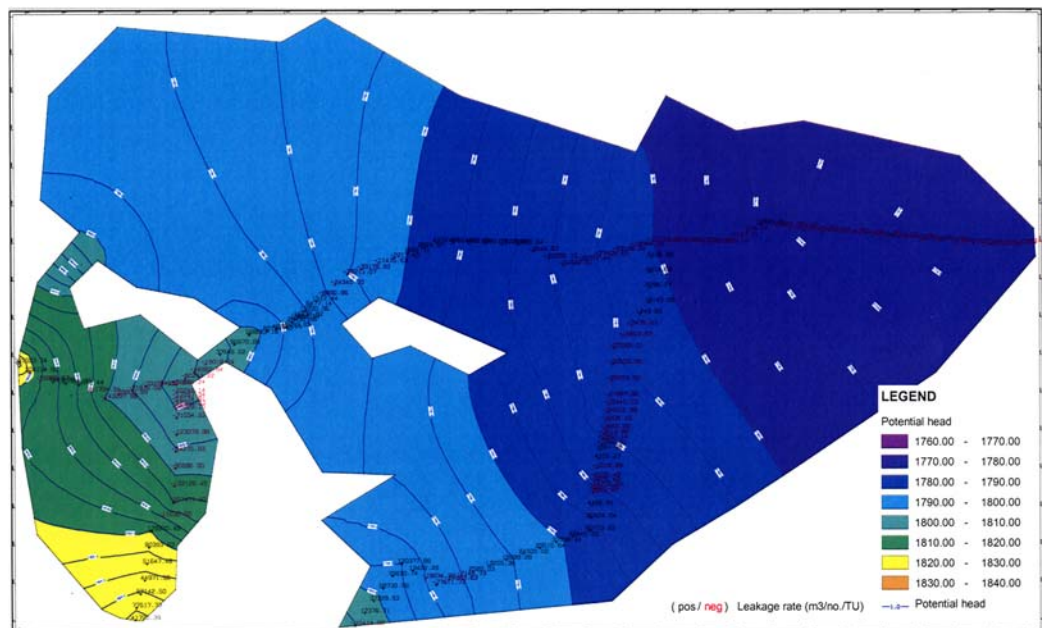


Figure 28 : Surface piézométrique obtenue en ne considérant que les flux souterrains entrants dans la zone d'étude, $K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $e_{moy} = 40$ m

Au niveau des cours d'eau, l'exfiltration a lieu principalement en aval du bassin au niveau du cours inférieur du Kaboul et du Logar respectivement à partir de 9 km et à partir de 7 km avant la confluence entre les deux cours d'eau. Une autre zone importante d'exfiltration est la partie Est du bassin de Darulaman au niveau du rétrécissement de la vallée avant l'entrée dans la plaine de Kaboul (cf figure 29). L'infiltration prédomine pour le Logar en revanche les volumes exfiltrés sont plus importants que les volumes infiltrés pour le Kaboul et le Paghman. Globalement $3,26 \cdot 10^6$ m³/mois s'exfiltrent et $2,23 \cdot 10^6$ m³/mois seulement s'infiltrent.

Au niveau de l'exutoire le volume sortant observé est de $0,66 \cdot 10^6$ m³/mois alors que le volume moyen estimé à partir du bilan est de $1,42 \cdot 10^6$ m³/mois.

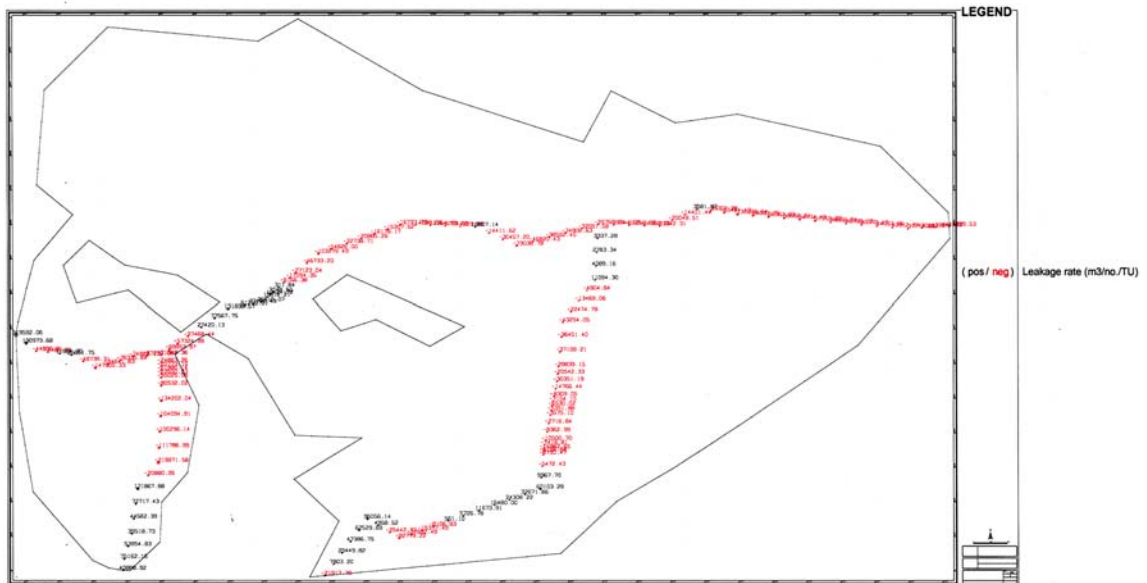


Figure 29 : Zones d'infiltration en noir et d'exfiltration des eaux souterraines en rouge

4.2.3.2

Observations avec les entrées eaux souterraines, pluie efficace et infiltration de versant ($K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $e_{moy} = 40$ m, eaux de fonte = $1 \cdot 10^6$ m³/mois)

La piézométrie observée est la même que précédemment sauf au niveau de la zone Nord du modèle où le niveau est légèrement plus élevé (cf figure 30). Globalement ce nouvel apport n'a pas une grande influence sur la piézométrie, ceci peut peut-être s'expliquer par le fait que tout apport nouveau s'exfiltre dans les fleuves. En effet on remarque que si les zones d'exfiltration et d'infiltration n'ont pas changées, les volumes s'infiltrant dans la nappe sont les mêmes voire un peu moins importants par contre les volumes exfiltrés sont plus importants. Au niveau de l'exutoire le volume sortant observé est de $0,81 \cdot 10^6$ m³/mois, ce qui est toujours loin des 1,42 estimés.

En augmentant considérablement la recharge due aux eaux de fonte en passant de 1 à $5 \cdot 10^6$ m³/mois, les niveaux piézométriques observés varient toujours entre 1829 et 1770 m, le gradient est certes plus important mais globalement les volumes d'eau en excès s'exfiltrent au niveau des cours d'eau. Il est difficile de déterminer le volume d'eau maximal qui pourrait s'exfiltrer au niveau des cours d'eau, mais il serait peut-être pertinent de limiter ce volume. Les processus d'infiltration et d'exfiltration au niveau des fleuves seront donc limités pour les simulations suivantes en utilisant les fonctions MXKI et MXKE (cf § 4.2.3.4). Sinon on peut aussi observer les conséquences sur le système lorsque aucun échange n'est possible au niveau des cours d'eau (cf § 4.2.3.6).

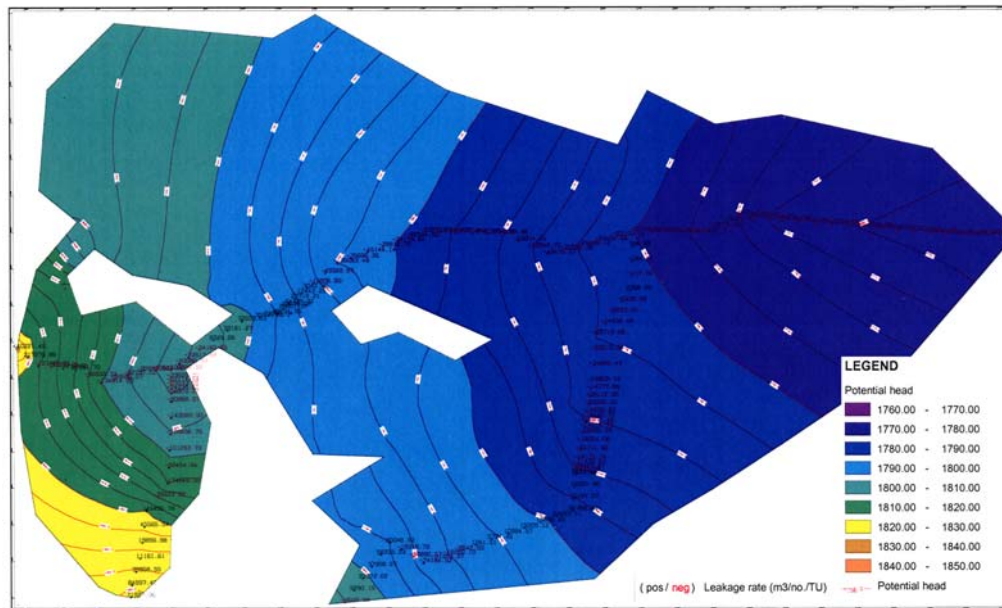


Figure 30 : Surface piézométrique obtenue en considérant 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces et $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$ d'eaux de fonte, $K_{\text{moy}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, $e_{\text{moy}} = 40 \text{ m}$

4.2.3.3 Mêmes simulations avec trois zones distinctes pour l'épaisseur

A l'aide des deux types de zones identifiées lors des campagnes de géophysique des années 60, on attribue les valeurs estimées suivantes :

- 60 m pour les zones identifiées comme supérieures à 30 m d'épaisseur ;
- 30 m pour celles données entre 10 et 30 m d'épaisseur ;
- et on applique la valeur de 10 m d'épaisseur au reste de la zone.

La différence par rapport aux résultats obtenus précédemment avec une valeur moyenne de 40 m sur toute la zone n'est pas significative et comme les investigations de 1965 semblent avoir été réalisées dans l'ensemble du bassin, ces résultats seront utilisés et les simulations seront effectuées avec trois zones d'épaisseurs. Les prochaines simulations sont réalisées avec les épaisseurs choisies ci-dessus et seules des variations de perméabilité seront effectuées.

4.2.3.4 Limitation des volumes infiltrés et exfiltrés au niveau des cours d'eau

Les valeurs pour limiter les processus d'infiltration et d'exfiltration dans les cours d'eau peuvent se baser d'une part sur les études d'infiltration réalisées dans les années 60 et sur les estimations faites pour l'infiltration dans la zone d'étude (cf § 3.2.3.2.1.1) ; d'autre part sur les valeurs observées lors des premières simulations.

Les zones d'infiltration sont globalement peu nombreuses et les taux observés lors des premières simulations sont de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ soit environ $0,92 \text{ L}/\text{m}/\text{min}$ au niveau du Logar, de $100 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ soit environ $2,31 \text{ L}/\text{m}/\text{min}$ à l'Est de la confluence Kaboul-Paghman et de l'ordre de $140 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ soit environ $3,24 \text{ L}/\text{m}/\text{min}$ à l'entrée dans la plaine de Kaboul (en considérant une distance moyenne inter-nœuds de 500 m et une recharge par les eaux de fonte

de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$). Ces valeurs sont assez proches de celles estimées à partir des études des années 60, elles sont donc choisies comme représentatives de conditions réalistes et comme limites pour les taux maximaux d'infiltration soit :

- $140 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ pour les Paghman et le Kaboul 1 ;
- $100 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ pour le Kaboul 2 ;
- $40 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ pour le Logar et le Kaboul 3 ;

Les taux d'exfiltration observés les plus élevés sont de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ en amont ce qui revient à une exfiltration d'environ $4,63 \text{ L}/\text{m}/\text{min}$ et varient entre 40 et $100 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ soit entre 0,92 et $2,31 \text{ L}/\text{m}/\text{min}$ dans la plaine. La valeur de $200 \text{ m}^3/\text{m}/\text{mois}$ est utilisée dans toute la zone pour limiter l'exfiltration, sauf au niveau de l'exutoire où aucune limite n'est affectée.

Plusieurs simulations en faisant varier les valeurs de perméabilité et de recharge sont effectuées afin de déterminer des valeurs extrêmes pour ces deux paramètres. Les résultats obtenus montrent que la valeur de perméabilité ne peut être inférieure à $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}/\text{s}$ pour un apport d'eaux de fonte de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$ et non inférieure à $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}/\text{s}$ si aucune recharge des pluies et eaux de fonte n'est prise en compte. On remarque qu'à partir d'un apport d'eaux de fonte de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$ la piézométrie devient trop élevée même avec de bonne valeur de perméabilité. Ainsi les valeurs de perméabilité doivent être comprises entre $2 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$ et la recharge par les eaux de fonte entre 0 et $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$. Avec un pourtour de 88030 m mesuré au niveau des pieds de versants avec XSUSI une recharge de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$ revient à une infiltration de $15 \text{ L}/\text{m}/\text{h}$ et donc d'environ $30 \text{ L}/\text{m}/\text{h}$ pour une recharge de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$.

On remarque que les zones d'infiltration et d'exfiltration sont toujours les mêmes et qu'il y a toujours plus d'exfiltration au niveau des cours d'eau qu'à l'exutoire. En moyenne l'écoulement à l'exutoire est trois fois moins important.

4.2.3.5

Mise en place d'un prélèvement au niveau de l'exutoire pour simuler l'écoulement supposé dans cette zone (3 épaisseurs, eaux de fonte= $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mois}$)

Un volume sortant est appliqué aux nœuds constituant la structure exutoire, soit une partie du cours inférieur du fleuve Kaboul et les deux nœuds à l'extrémité Est du modèle. La participation des eaux souterraines à l'écoulement à l'exutoire peut être grossièrement estimée comme étant la différence entre l'écoulement à Tangi Gharu et la somme des écoulements dans les cours d'eau entrants dans la zone d'étude, soit $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (cf § 4.1.2.2.3).

Cet écoulement forcé provoque une baisse significative du niveau piézométrique jusqu'à 1735 m au niveau de l'exutoire. En revanche aucune perturbation n'est observée pour le reste du modèle.

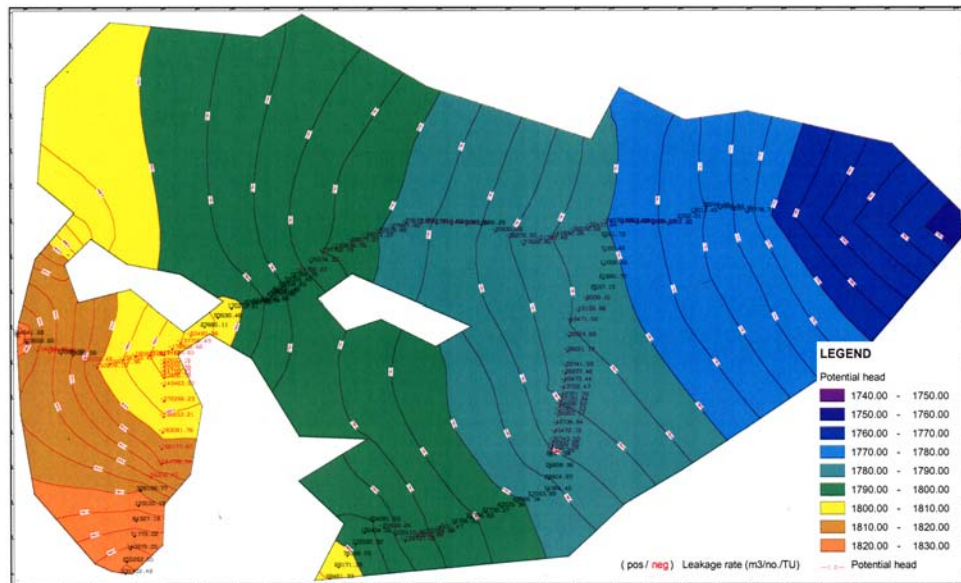


Figure 31 : Surface piézométrique obtenue en considérant un prélèvement à l'exutoire, 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces et $1 \cdot 10^6$ m³/mois d'eaux de fonte, $K_{moy} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s

En ce qui concerne les relations nappe-rivières, les zones d'infiltration et d'exfiltration ne changent pas. Le taux d'exfiltration ne change pas en revanche on observe un taux d'infiltration plus important au niveau du cours inférieur du Kaboul, cet entrant étant provoqué par le prélèvement simulé dans la zone.

On peut essayer d'améliorer la valeur de perméabilité pour voir quelles sont les valeurs nécessaires pour faire remonter la piézométrie.

Si on augmente la perméabilité jusqu'à $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, la piézométrie en amont reste comprise entre des valeurs de 1825 à 1800 m en revanche au niveau de l'exutoire on descend toujours à des niveaux de l'ordre de 1750 m et une infiltration des eaux de surface est toujours provoquée juste en amont de la zone où est simulé le prélèvement (cf figure 31).

4.2.3.6

Sans échanges avec les fleuves

Cela pourrait correspondre à un colmatage des berges. Seul le cours inférieur du Kaboul est modélisé en tant que cours d'eau pour qu'il y ait quand même un exutoire possible ; les flux sortants seront observés dans cette zone. Les simulations sont réalisées en prenant en compte les flux souterrains et une infiltration de 100% des pluies efficaces.

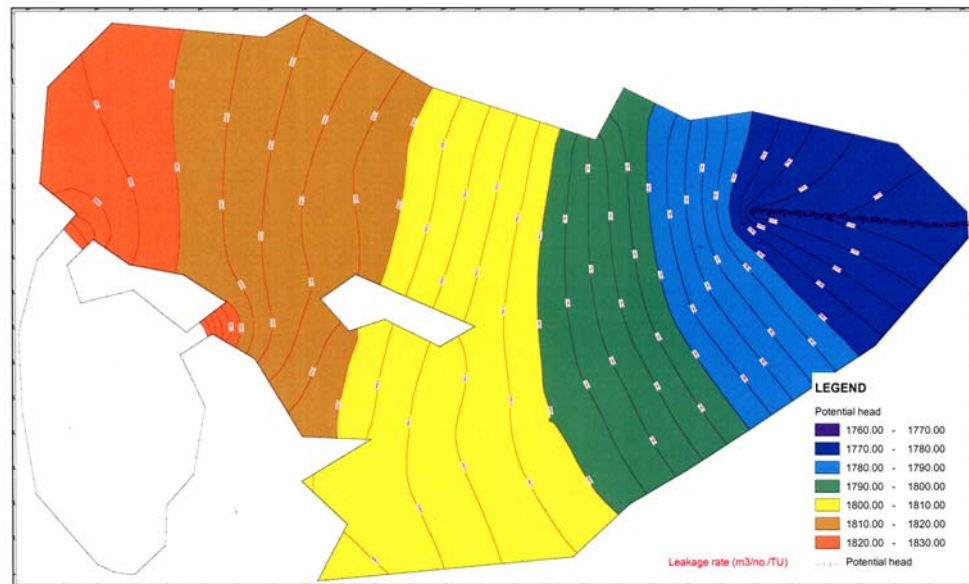


Figure 32 : Surface piézométrique obtenue en considérant les échanges nuls avec les cours d'eau, 100% d'infiltration des eaux de pluies efficaces, $K_{moy} = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s

On remarque globalement que les écoulements sont plus difficiles et que les isopièzes sont largement au dessus de la surface topographique en amont du bassin (cf figure 32). On obtient des débits sortant de l'ordre de $1,5 \cdot 10^6$ m³/mois à l'exutoire uniquement pour des valeurs de perméabilité très bonne soit $1 \cdot 10^{-3}$ m/s et en ayant toujours des valeurs allant jusqu'à 1838m en amont du bassin.

Si on simule un autre exutoire au Nord du bassin, les niveaux piézométriques ne dépassent pas 1829 m cependant les valeurs atteintes en plaine sont toujours globalement trop élevées. Les écoulements sont de $1,12 \cdot 10^6$ m³/mois à l'exutoire Tangi Gharu et de $0,5 \cdot 10^6$ m³/mois au Nord.

4.2.3.7 Conclusion

Les simulations en régime permanent permettent déjà d'obtenir des informations intéressantes. En particulier au niveau des échanges nappes-rivières des zones précises d'infiltration et d'exfiltration ont été identifiées, les cours d'eau drainent les eaux souterraines dans l'Est de la plaine de Kaboul. L'étude montre l'importance majeure des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans la zone d'étude. Sans échange possible il faudrait que l'aquifère présente de très bonnes valeurs de perméabilité supérieures à $1 \cdot 10^{-3}$ m/s pour que les flux souterrains entrants dans la zone s'écoulent jusqu'à l'exutoire et dans ce cas seulement les écoulements observés à l'exutoire sont de l'ordre de $1 \cdot 10^6$ m³/mois.

Il est peu probable que les valeurs de perméabilité soient si élevées et qu'il n'y ait pas d'échange au niveau des cours d'eau. Les flux à l'exutoire ne sont donc pas aussi importants que la valeur supposée à partir du bilan. Les simulations en provoquant un prélèvement dans cette zone ou en supprimant l'échange avec les cours d'eau montrent que l'écoulement ne peut pas être aussi important dans cette zone et que le système se vidange en grande partie par exfiltration dans les cours d'eau bien avant d'atteindre la zone proche de Tangi Gharu. D'après ces premières simulations, l'écoulement souterrain à l'exutoire varie plutôt entre 0,3 et $0,8 \cdot 10^6$ m³/mois.

Différentes valeurs de perméabilité et de recharge ont été testées permettant de définir grossièrement les ordres de grandeurs probables pour ces paramètres (cf § 4.2.3.4). Le problème majeur est que les résultats sont difficiles à interpréter du fait que la surface du sol n'est pas représentée et que les niveaux piézométriques observés sont proches de cette surface. Du coup les résultats ne sont écartés que lorsque les valeurs sont vraiment trop élevées ou trop basses, sinon il est difficile de déterminer précisément en tout point si le niveau piézométrique est au dessus ou en dessous de la surface du sol.

Les simulations en régime permanent sont cependant peu représentatives de la réalité car tous les flux sont entrés sous forme de valeurs moyennes pour un même pas de temps, alors qu'ils n'interviennent pas tous au même moment au cours de l'année. Le régime transitoire est alors très important car il permet de prendre en compte cette distribution temporelle des flux et permet d'obtenir des résultats plus intéressants.

4.2.4 Simulations en régime transitoire : scénarii et résultats

Les simulations en régime transitoire n'ont pas encore été effectuées, cependant une démarche à suivre et différents scénarios peuvent déjà être envisagés.

D'une part on peut travailler au pas de temps mensuel pour observer les variations du système lors d'une année standard (cf annexe 4). Les valeurs des années 60-70 sont utilisées en faisant varier les valeurs de recharge et de porosité. A partir des résultats obtenus il serait intéressant de voir :

- si le système reste plus ou moins stable au cours du temps ;
- le battement annuel de la nappe ;
- les écoulements à différentes périodes de l'année ;
- l'évolution des relations nappes – rivières au cours de l'année.

D'autre part on peut travailler au pas de temps annuel (cf annexe 4) et envisager plusieurs scénarii probables pour simuler l'évolution de la piézométrie du système jusqu'à l'état actuel, soit une baisse moyenne de 7 m. Par exemple l'accroissement de la population peut être simulé par une augmentation progressive des prélèvements ; un état de sécheresse peut l'être en diminuant les taux de recharge.

Les simulations en régime transitoire permettent également d'apprécier la valeur d'un nouveau paramètre: la porosité.

4.3 Bilan de l'étude

L'objet de cette étude était de fournir une première recherche en vue d'une modélisation du système aquifère dans la région de Kaboul. Il s'agissait de réaliser un modèle numérique simple pour avoir une idée des écoulements et comportements possibles du système.

4.3.1 Regard critique sur l'étude

Plusieurs raisons peuvent affecter la qualité de cette étude.

La première est due aux données utilisées, celles-ci sont peu nombreuses et de qualité difficilement estimable.

Les chroniques disponibles ne sont pas suffisamment représentatives du fonctionnement du système et il manque des données pour quantifier toutes les composantes du bilan hydrologique. Les données pluviométrique et de température ne sont fournies que par une seule station, les débits des cours d'eau sont mesurés sur deux à cinq années seulement. Les informations concernant la géologie et les caractéristiques du système aquifère sont vagues. Les informations concernant la lithologie et les propriétés hydrodynamiques sont issues d'investigations ponctuelles dans l'espace et ne peuvent caractériser l'étendue et les propriétés du système aquifère dans toute la zone d'étude. Même si le travail est effectué avec des moyennes pour représenter une année standard, les données ne se rapportent pas toutes aux mêmes années et il est peut-être délicat de les confronter et de les utiliser ensemble.

De plus, il est difficile d'évaluer la qualité des données. La façon dont ont été acquise ces données, c'est-à-dire des informations détaillées sur le matériel et les appareils de mesure utilisés ainsi que sur les conditions d'enregistrement, d'évaluation du bon déroulement des investigations et les ordres de grandeurs des erreurs pouvant être associées aux données ne sont pas fournis dans les rapports.

La deuxième est le manque de connaissances sur les processus pouvant avoir un impact sur le bilan hydrologique dans la région, ainsi seules différentes hypothèses peuvent être formulées. Il est par exemple difficile d'évaluer les pertes en eau par évaporation dans la zone. Si les pluies efficaces peuvent être estimées à partir des données, on ne peut déterminer précisément quelle est la part qui s'infiltré et participe réellement à la recharge des eaux souterraines. De même, si des estimations pour le volume d'eau fourni par les apports de versants peuvent être faites, nous n'avons aucune information suffisamment précise pour caractériser le comportement de ces eaux dans la zone d'étude. Comme pour les pluies, les volumes d'eau peuvent s'infiltrer mais aussi ruisseler et s'écouler en dehors du bassin par l'intermédiaire du réseau hydrographique.

La troisième est que même si l'étude a été menée avec rigueur et attention, des erreurs dans le raisonnement ou des erreurs de calculs sont toujours possibles.

En ce qui concerne le modèle, il faut bien rappeler que tous les résultats et informations obtenues doivent être utilisés avec précautions. Celui-ci a été effectué avec peu de données et constitue une représentation très simplifiée de la réalité. En aucun cas donc les résultats obtenus ne peuvent être représentatifs du fonctionnement réel du système aquifère dans la zone de la ville de Kaboul et ils ne devraient donc pas servir de base solide pour d'autres études ou des actions menées sur le terrain et seulement être considérés comme premières hypothèses de fonctionnement. Les critiques majeures qui peuvent être faites sur ce modèle sont les suivantes :

La distribution hétérogène dans l'espace des paramètres hydrodynamiques tels que la perméabilité, la porosité ne sont pas pris en compte dans ce modèle faute de données valables. Le modèle devrait être en trois dimensions et un zonage des valeurs de ces paramètres devrait être fait pour mieux prendre en compte l'hétérogénéité du réservoir. Car avec une seule valeur de ces paramètres sur toute la zone, le comportement du système ne peut pas vraiment être apprécié.

Le modèle n'est qu'en deux dimensions, les différentes couches constitutives du système aquifère et la surface du sol ne sont pas représentés. Si on considère que les eaux souterraines peuvent s'exfiltrer dans les cours d'eau, elles peuvent très bien aussi s'exfiltrer en tout point du modèle. La difficulté dans cette étude est que nous ne disposons pas de valeurs suffisamment précises de la topographie alors que nous observons une nappe dont les niveaux sont très proches du sol. Pour interpréter correctement les résultats des simulations la surface du sol devrait être intégrée dans ce modèle. Auquel cas la zone urbaine pourrait être considérée comme une surface imperméable pour les simulations du système pendant les années 2005 car beaucoup de zones sont bétonnées et ce phénomène va sûrement s'étendre dans les années à venir (cf figure ci-dessous).



Figure 33 : Le fleuve Kaboul dans le centre de la capitale (T.Krekeler)

Enfin pour vérifier la viabilité d'un modèle on compare généralement les valeurs calculées par le modèle aux valeurs mesurées sur le terrain. Or actuellement peu de données sont mises à disposition car les études et investigations dans la région à Kaboul n'en sont qu'à leur début. Les hypothèses ou estimations faites dans cette étude ne peuvent être vérifiées que grâce à la continuation et à l'intensification des investigations à Kaboul. De plus, les données à partir desquelles le modèle a été construit datent essentiellement des années 60-70, depuis, l'état du

système et son fonctionnement hydrodynamique ont pu évoluer. Il faudra donc utiliser et traiter les données obtenues actuellement en connaissance de cause, soit tenir compte du fait qu'elles représentent les conditions actuelles de fonctionnement du système et non pas celles du passé. Les facteurs qui ont pu influencer les conditions de recharge, de vidange et les écoulements dans la zone de Kaboul, ainsi que leurs conséquences doivent être identifiés et évalués. Les conditions climatiques sont par exemple actuellement différentes car le pays est soumis à une période de sécheresse depuis 4-6 ans, il faudrait donc attendre un retour à des conditions normales pour pouvoir comparer les mesures de pluviométrie ou de température à celles mesurées dans les années 60-70.

Ainsi il est difficile de vérifier la viabilité du modèle. Les données qui ne devraient pas avoir changé en quarante ans sont les paramètres hydrodynamiques du réservoir.

4.3.2 Quelles sont les principales informations nouvelles obtenues grâce à l'étude ?

L'étude a tout d'abord permis de faire un état des lieux des informations disponibles au BGR mais aussi de rechercher et de d'obtenir d'autres informations sur la région. D'autre part elle représente une première réflexion sur le cycle de l'eau et les différents processus et composantes susceptibles d'influencer la recharge des eaux souterraines à Kaboul. Elle fournit une vision synthétique des données grâce à l'établissement d'un bilan hydrologique dans la zone d'étude. Le bilan peut être considéré comme déséquilibré à partir d'un écart supérieur à $22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ entre les flux entrants et sortants (cf § 3.2.3.2.2.2) ;

Elle permet de donner pour les paramètres et flux étudiés des ordres de grandeurs probables et d'envisager différents scénarii possibles pour la recharge du système. Une valeur de perméabilité moyenne appliquée à toute la zone doit rester dans des ordres de grandeur compris entre $1 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Une porosité supérieure à 7,5% serait envisageable. La recharge du système aquifère par les eaux de pluies et les apports de versants dans la zone d'étude pendant la période hivernale soit entre Décembre et Mai peut être estimée entre 0 m^3 si l'infiltration n'est pas possible et $18,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ($7,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3 + 10,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) pour une infiltration de 100%, ce qui correspond à 63 mm/m^2 . Pour les autres périodes de l'année, les flux souterrains peuvent varier suivant le niveau piézométrique, l'évaporation pourrait entraîner des pertes pour le système aquifère, des pertes d'une valeur de $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sont constatées dans la zone d'étude et peuvent être attribuées à l'évaporation et/ou à l'irrigation mais nous n'avons aucune indication pour savoir si les pertes concernent uniquement les eaux de surface ou également les eaux souterraines. Les besoins en eau de consommation sont passés de $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en 1962 à $43 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en 2005, si on considère une consommation de base de 40L/j/hab.

L'étude permet d'identifier différentes zones dans le domaine d'étude. En particulier dans le bassin de Darulaman le gradient hydraulique est plus important et cette zone est bien alimentée par les aquifères de Paghman et Kaboul même lorsque aucun autre flux entrant n'est pris en compte et lorsque les prélèvements sont très importants (cf annexe 26). Dans la plaine de Kaboul, le sol est relativement plat et le gradient hydraulique plus faible. La partie qui semble la plus vulnérable à des prélèvements intenses est la partie Nord-Ouest de part sa position, en effet elle est ceinturée de reliefs, ce qui implique que lors de prélèvements intenses des limites imperméables sont assez rapidement atteintes dans cette zone ou plutôt on remarque que la zone est faiblement alimentée par les écoulements des eaux souterraines contrairement au bassin de Darulaman et au sud de la plaine. Par contre la zone peut être alimentée grâce au ruissellement des eaux en provenance des reliefs. On note que ceci peut aussi être un désavantage (risques d'inondation) pour cette zone si les sols trop imperméabilisés empêchent l'infiltration.

Elle permet de supposer des relations nappe-rivières importantes dans la région. Les niveaux piézométriques très proches du sol entraînent des échanges importants avec les cours d'eaux. On observe une zone d'infiltration dans la partie amont de notre zone d'étude dans le bassin de Darulaman, ceci peut peut-être s'expliquer par le fait que les eaux souterraines sont décrites comme étant moins proches de la surface dans cette zone. Ensuite il y a une zone importante d'exfiltration avant l'entrée dans la plaine de Kaboul qui s'explique probablement par le resserrement de la vallée constituant un obstacle à l'écoulement des eaux souterraines. Une fois passé ce resserrement les eaux de surface s'infiltreront de nouveau sur deux ou trois kilomètres dans la plaine de Kaboul. Dans la zone du Logar, il y a également une zone d'infiltration lors de l'arrivée dans la plaine, là aussi cela peut peut-être s'expliquer par le passage étroit au niveau du village de Nawesta et donc un aquifère peut conséquent dans cette zone et principalement alimenté par le Logar. Toute la partie Est de la zone d'étude montre très clairement un processus d'exfiltration des eaux souterraines et ceci paraît réaliste puisque peu à peu le bassin se resserre dans cette zone en se rapprochant des gorges de Tangi Gharu qui sont considérées comme l'exutoire du bassin. Cependant plus d'informations sur la géologie de cette zone permettrait de mieux évaluer le comportement possible des eaux souterraines dans cette zone. Avec d'important prélèvements dans la zone créée pour représenter la ville, on observe que l'infiltration est majoritaire jusque vers la confluence avec le Logar ce qui s'explique par un niveau plus bas des eaux souterraines (cf annexe 26).

Pour permettre des interprétations plus pertinentes, les relations nappes rivières doivent être davantage étudiées au pas de temps mensuel grâce à des simulations en régime transitoire et pour bien identifier les périodes auxquelles peuvent être liés ou non les processus d'infiltration ou d'exfiltration.

Elle permet de soulever de nouvelles questions.

Si le fleuve Kaboul est principalement alimenté par les eaux souterraines dans la plaine à une période donnée alors la baisse de niveau piézométrique favoriserait l'assèchement du cours d'eau. Actuellement des barrages construits dans les vallées du Paghman et du Kaboul permettent d'effectuer des lâchés d'eau en été pour subvenir aux besoins en irrigation et maintenir un débit minimum dans les cours d'eau. Cependant on peut se demander si cette eau arriverait jusque dans le centre de la vallée de Kaboul si les niveaux d'eaux souterraines sont bas et l'infiltration à partir du lit des cours d'eau importante lors de ce parcours.

Si la recharge des eaux souterraines dans la région de Kaboul est principalement due à l'infiltration des eaux de pluies et de fonte des neiges au niveau de la plaine et/ou des pieds de versants au niveau du pourtour du bassin géologique, alors on peut supposer que du fait de l'urbanisation croissante dans la zone, la recharge du système risque d'être limitée pour les prochaines années. En effet la ville se densifie et s'étend de plus en plus au niveau des versants ; elle se modernise et de plus en plus de rues sont bétonnées. L'augmentation des surfaces imperméables favoriserait alors le ruissellement plutôt que l'infiltration et le volume d'eau disponible pour la recharge s'écoulant rapidement vers l'aval du bassin pourrait être perdu. De plus on peut ajouter qu'un ruissellement important et non contrôlé risque d'aggraver les problèmes d'inondations qui touchent déjà la région lors de la période printanière lorsque les fortes pluies d'avril s'associent à la fonte des neiges.

Enfin, cette étude démontre les limites d'utilisation d'un modèle numérique simplifié et le besoin d'améliorer ce dernier ou de créer un modèle plus complexe. Elle conduit à l'évaluation des données manquantes et permet de proposer des études qui pourraient être réalisées pour l'obtention de nouvelles informations.

4.3.3 Evaluation des données manquantes et propositions pour la suite de l'étude

Les principales données nécessaires pour une meilleure gestion des eaux souterraines sont les caractéristiques du réservoir (configuration, propriétés hydrodynamiques) et de son fonctionnement (recharge, vidange, écoulements)

4.3.3.1 A court terme

Il faut continuer la recherche et la collecte d'informations sur la zone d'étude ou sur d'autres zones présentant des caractéristiques similaires pour améliorer la compréhension des processus pouvant jouer un rôle important dans la région. Il faut également mieux identifier et évaluer la nature et la valeur des données qui sont actuellement collectées sur le terrain ou qui pourraient l'être facilement et qui peuvent être utilisées pour améliorer les résultats de cette étude.

Continuer la modélisation avec un modèle numérique pose la question de savoir si le modèle créé lors de cette étude peut être amélioré et utilisé pour obtenir de nouveaux résultats, ou s'il est préférable de réaliser un nouveau modèle plus complexe. Auquel cas les caractéristiques de ce nouveau modèle et les données nécessaires à sa création devront être précisément définies.

Le modèle actuel pourrait par exemple être amélioré :

- en raffinant certaines zones en particulier au niveau des fleuves ;
- en essayant de modéliser la surface du sol ;
- en créant différentes zones de perméabilité ; des valeurs moyennes pourraient par exemple être appliquées dans les zones délimitées par les études géophysique.

Des simulations en régime transitoire doivent être effectuées. Puis il faudrait définir plus précisément quelles sont les limites du modèle numérique créé et quels devraient être les éléments à prendre en compte pour la création d'un futur modèle.

En ce qui concerne les investigations de terrain, des données caractérisant le système pourraient être théoriquement assez rapidement obtenues, cependant les conditions difficiles sur place ne facilitent pas le lancement des études scientifiques.

Pour l'identification et l'évaluation des différentes composantes de la recharge des eaux souterraines, des analyses isotopiques des eaux de pluies, des cours d'eaux et des eaux souterraines peuvent être envisagées. En effet une campagne d'analyse chimique a été menée par le BGR mais par manque de moyens financiers, les isotopes n'ont pas été analysés. En étudiant les isotopes de l'eau il serait possible de caractériser chaque source d'eau et d'identifier d'éventuels mélanges ce qui traduirait par exemple une alimentation par les eaux de pluies ou par de la neige fondue. Pour cela il faudrait disposer d'échantillons des différentes ressources (eaux souterraines, rivières, pluies). Des données isotopiques concernant les pluies sont disponibles dans la banque de données de l'IAEA (International Atomic Energy Agency) (8) dans le cadre du GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation).

Des essais de pompages permettraient d'obtenir rapidement des informations sur la composition et les propriétés hydrodynamiques des différentes couches aquifères.

Ces investigations supposent néanmoins des moyens financiers importants.

(8) <http://www.iaea.org/>

4.3.3.2 A long terme

Il serait nécessaire de mettre en place des réseaux de stations de mesure en continu de paramètres tels que les variations du niveau des eaux souterraines, les caractéristiques climatiques (pluviométrie, température,...), les niveaux des cours d'eau. Il faudrait aussi répertorier tous les cours d'eau ou canaux existants et pouvant avoir une influence sur les entrées et les sorties d'eau dans le bassin.

Des recherches particulières doivent être menées concernant :

- Le phénomène de fonte des neiges et l'évaluation des apports potentiels possibles pour la recharge en fonction de l'importance de la couverture neigeuse ;
- L'étude de l'évolution climatique dans la zone pour identifier les causes et caractériser l'importance et la probabilité des périodes de sécheresse. Les conséquences possibles de tels changements climatiques en terme d'évolution des précipitations, de la couverture neigeuse, ainsi que de l'évaporation. Enfin, évaluer plus précisément les conséquences de la sécheresse sur la recharge des eaux souterraines ;
- Une meilleure identification des zones et des conditions de recharge des eaux souterraines (période, volume disponible). L'identification pourrait se faire par photo-interprétation d'images satellites, en observant la région à différentes saisons il serait peut-être possible d'identifier précisément les zones urbaines, les zones végétalisées ou à sols nus, de repérer les zones en eaux, enneigées et irriguées. Ainsi il serait peut-être possible en suivant l'évolution de ces zones dans le temps de déterminer la période et les zones de fonte des neiges, la période et les zones d'irrigation. Les conditions pourraient être caractérisées par des études de sols et de meilleures connaissances concernant les phénomènes d'infiltration et de circulation des eaux dans la zone non saturée du sol dans cette région.
- On a considéré dans l'étude que les différents niveaux aquifères sont totalement interconnectés et ne constituent qu'un seul aquifère, cependant des connaissances plus approfondies en ce qui concerne l'interconnexion des différentes couches aquifères dans le système et les échanges possibles entre les eaux de surface et les eaux plus profondes seraient nécessaires pour évaluer les risques de pollution.

Enfin, la réalisation de documents pour l'aide à la décision tels que des cartes thématiques et des banques de données partagées entre les acteurs de la gestion de l'eau doit être à terme l'objectif d'une telle étude. Un modèle numérique couplé avec un SIG permettrait des échanges rapides d'informations d'un outil à l'autre ; les banques de données des deux programmes pourraient être complétées au fur et à mesure de nouvelles études de terrain. Les principaux résultats des simulations pourraient être directement utilisés dans le SIG et croisés avec les autres couches d'informations. Le logiciel SPRING présente par exemple une interface permettant des échanges avec ArcView.

4.3.3.3 Le partage et la diffusion de l'information

Le fait d'avoir des contacts sur place est très positif car ces personnes ont un regard direct sur la région et les phénomènes qui s'y déroulent, de plus elles sont en lien avec les autorités et la population à Kaboul et peuvent parfois obtenir des informations plus facilement.

Même si les équipements sur le terrain sont encore peu nombreux et ne représentent que des sources ponctuelles de données, il est déjà intéressant de pouvoir effectuer un suivi en continu de certains paramètres, c'est pourquoi un meilleur partenariat et échange d'informations entre les différents organismes travaillant à Kaboul devrait être organisé.

Actuellement, de nombreux organismes différents mènent des investigations sur le terrain, cependant les données récoltées ou les études effectuées ne sont pas suffisamment identifiées et diffusées.

Etant donnée la situation d'urgence à Kaboul, les données et études permettant d'améliorer les connaissances sur la qualité et la quantité des ressources en eaux de la région devraient être largement partagées et diffusées. Dans ce cadre la présente étude devrait donc être prochainement disponible sur le site Internet du BGR.

Conclusion générale

L'analyse et la synthèse des données disponibles actuellement au BGR a permis d'établir une première hypothèse de fonctionnement hydrologique et hydrogéologique au niveau de la zone d'étude comprenant une partie des bassins géologiques de Darulaman et de Kaboul. De premières estimations concernant le bilan hydrologique, ainsi que la recharge des eaux souterraines dans la zone d'étude ont pu être faites, néanmoins ces valeurs calculées et estimées sont basées sur très peu de données dont la qualité est difficilement vérifiable et doivent être utilisées avec précaution. Cette étude montre alors qu'il y a toujours une part d'incertitude concernant les processus susceptibles de jouer un rôle dans le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique de la zone et combien il est nécessaire de continuer les investigations dans la zone et d'obtenir de nouvelles informations. La réalisation du modèle numérique est un premier exercice de modélisation du système aquifère dans la zone d'étude et permet une première réflexion quant à la distribution spatiale et temporelle des flux à prendre en compte. La distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques du réservoir est en revanche insuffisamment précise et l'étude montre aussi les limites d'utilisation d'un modèle trop simplifié. Si celui-ci a permis d'obtenir des représentations s'approchant de la réalité, les résultats doivent être utilisés encore une fois avec précaution.

Afin de répondre à des besoins précis et d'orienter la politique d'exploitation et de gestion de l'eau à Kaboul, un modèle ne peut être utile à l'aide à la décision que si la qualité des résultats peut être évaluée ou vérifiée. Un modèle doit être calé avec des données récoltées sur le terrain et le suivi doit être continu et permettre de vérifier et de recalibrer périodiquement le modèle. Incorporer de nouvelles informations, comme des variations dans les perturbations imposées ou effectuer des révisions du modèle conceptuel sont les moyens d'évaluer la nature et l'importance des erreurs de prévision et conduisent à une amélioration de la connaissance du système et de la valeur du modèle. Des prévisions avec une plus grande fiabilité peuvent alors être faites. Il est donc indispensable de continuer l'étude et la collecte de données à Kaboul.

Actuellement, différents organismes travaillent à la mise en place de réseaux de mesure des paramètres climatique et hydrologique et hydrogéologique cependant il serait nécessaire de mieux identifier les différentes actions menées sur place afin de combiner les efforts et de partager les données obtenues ce qui optimiserait le travail effectué.

De plus les investigations dans la région de Kaboul doivent être couplées avec une politique de terrain de sensibilisation de la population à l'économie et à la protection de la ressource en eau, d'organisation de l'exploitation et de la gestion de l'eau ainsi que de la gestion des crises dues aux périodes de sécheresse (pénurie, conflits d'usages, surexploitation). Les études ne doivent pas uniquement concerner les eaux souterraines mais toutes les ressources potentiellement utilisables pour les activités humaines afin d'anticiper les pénuries et de prévoir des ressources alternatives. Enfin, si les études permettent d'améliorer les connaissances nécessaires à une gestion durable des ressources en eau à Kaboul, celle-ci ne peut se mettre en place que par une volonté politique et des structures compétentes ayant en charge l'exploitation et la protection de l'eau.

Sigles

AA	Auswärtiges Amt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMV	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CARE	organisation humanitaire
CAWSS	Central Authority for Water Supply and Sewerage
DACAAR	Danish Committee for Aid to Afghan-Refugees
DED	Deutscher Entwicklung-Dienst
ETP	Evapo-Transpiration Potentielle
ETR	Evapo-Transpiration Réelle
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation
GPS	Global Positioning System
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
IAEA	International Atomic Energy Agency
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
MMI	Ministère afghan des Mines et de l'Industrie
ONG	Organisation Non Gouvernementale
SIG	Système d'Information Géographique
SPRING	Simulation Prozess in Grundwasser
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USAID	United States Agency for International Development
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversal Mercator
WGS	World Geodetic System
ZNS	Zone Non Saturée

Bibliographie

- (1) Prof.Dr.A HERRMANN, PD Dr.T HIMMELSBACH, January 2003, Evaluation report on "Drought related disaster preparedness and disaster management activities in the framework of a human resources development project"
- (2) PROCTOR & REDFERN INTERNATIONAL LIMITED, 1972, Water Supply Sewerage Drainage and Solid Waste Systems for Greater Kabul, Joint Interim Master Plan, Report for ROYAL GOVERNMENT OF AFGHANISTAN CENTRAL AUTHORITY FOR HOUSING AND TOWN PLANNING, der WORLD HEALTH ORGANIZATION und des UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME [unpublished]; BGR file number: 0030084
- (3) BÖCKH, E.G, 1971, Report on the Groundwater Resources of the City of Kabul, Report for BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE [unpublished]; BGR file number: 0021016
- (4) PIAS. J, 1976, Formations superficielles et sols d'Afghanistan, travaux et documents de l'ORSTOM n°55
- (5) PIAS. J, 1972, Sols d'Afghanistan. Pédogenèses anciennes et actuelles
- (6) PIAS. J, 1969, Rapport scientifique sur la campagne 1968 en Afghanistan, ORSTOM-SSC Bondy
- (7) PIAS. J, 1970, Rapport scientifique sur la campagne 1969 en Afghanistan, ORSTOM-SSC Bondy
- (8) BLAISE. J, BORDET. P, BOULIN. J, BOUYX. E, DESPARMET. R, LANG. J, LAPPARENT. A.F.de, MENNESSIER. G, MONTENAS. C, PIAS. J, 1972, Données stratigraphiques et évolution orogénique en Afghanistan
- (9) HOUBEN. G, 2005, Hydrogeology of the Kabul Basin, geology, aquifers characteristics, climate and hydrography, BGR file number: 10277/05
- (10) HOMILIUS. J, 1965-1966, Hydrogeologische und geoelektrische Untersuchungen in den Kabul-Becken, Afghanistan; Teil 2: Geoelektrischer Bericht 1965/66, Report für die BUNDESANSTALT FÜR BODENFORSCHUNG [unpublished]; BGR file number: 0020506.
- (11) MYSLIL, V., NAIM EQRAR, M. & HAFISI, M, 1982, Hydrogeology of Kabul Basin, Report for UNITED NATIONS CHILDREN FOUND UND DAS MINISTRY OF WATER AND POWER DEMOCRATIC REPUBLIC OF AFGHANISTAN [unpublished].
- (12) HOUBEN Georg, 2005, Hydrogeology of the Kabul Basin, groundwater geochemistry and microbiology, BGR file number: 10277/05
- (13) AUST, H, 1979, Evaluation of Pumping Tests of Wells for the Afshar Project, Water Supply of the City of Kabul, Afghanistan, Report for BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE [unpublished]; BGR file number 81639.
- (14) BANKS, D, 2002, Guidelines for sustainable use of groundwater in Afghanistan, NCAAP.

Annexe 19 : Adéquation entre les données disponibles concernant les eaux de souterraine et les eaux de surface avec les limites du modèle	112
Annexe 20: Les structures du modèle	113
Annexe 21: Fonctions utilisées dans le programme pour entrer les valeurs des différents paramètres	113
Annexe 22: Zonage des épaisseurs	114
Annexe 23: Visualisation des nœuds auxquels la fonction KNOT peut être attribuée	114
Annexe 24: Formats utilisés dans les fichiers texte	115
Annexe 25: Coupe géologique dans le bassin de Kaboul issue d'un rapport de J.Pias (réf 4)	117
Annexe 26: Surface piézométrique obtenue lors d'un prélèvement considérant 3 millions d'habitants à Kaboul et une bonne infiltration des eaux de surface ($K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s)	117

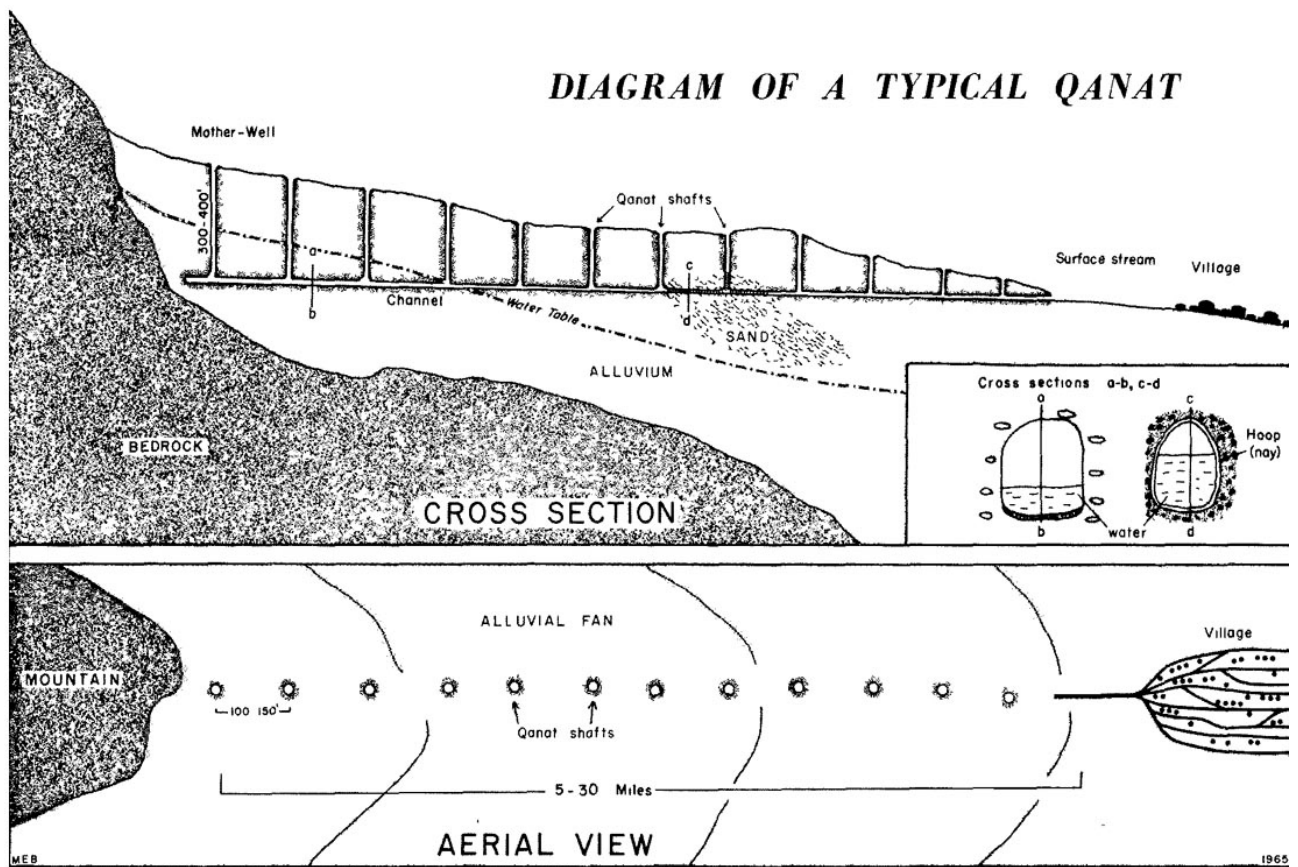
Annexe 1 : Programme de la conférence des 2 et 3 août 2005 à Kaboul

Time	Subject	Input presented by	Chairman
02.08.2005			
8:30 – 9:00	Registration, Warming Up		
9:00 – 10:00	Opening Ceremony - Recitation - Opening Addresses	Mr. Zia Masood Vicepres. Gov. Afghanistan; Mr. Ismael Khan Minister for Energy and Water, Mr. Mir Mohamed Sediq Minister for Mines & Industries (Secretary General of High Commission for Coordination in the Water Sector) Ms Annette Klein German Deputy Ambassador; Mr. Michael Schmidt-Thomé (BGR)	
10:00 – 10:30	Tea Break		
10:30 – 12:00	Presentation: Outlines of River Basin Approach and New Institutional Set-Up of the River Basin Management (45 min), Discussion	Mr. Sultan Mahmood Dir. Water Resources, MEW Mr. Hans Husselman RODECO/GTZ	Mir Mohamed Sediq, Minister for Mines & Industries (Secretary General of High Commission for Coordination in the Water Sector) (10:30 - 17:00)
12:00 – 13:30	Lunch-Break and Recitation		
13:30 – 15:00	Introduction (10 min) Presentation (40-60 min): Groundwater Resources of the Kabul Basin, Quantity and Quality (Report of the Kabul Groundwater Survey 2003 - 2005)	Mr. Thomas Himmelsbach (BGR) Mr. Naim Eqrar (KU) Mr. Georg Houben (BGR)	
15:00 – 15:30	Tea Break		
15:30 – 17:00	- Current State and Outlook of Groundwater Monitoring in Kabul Basin (10 min) - General Options for Groundwater Protection (20 min) - Discussion and Wrap up of the day	Mr. Thomas Himmelsbach (BGR) Mr. Torsten Krekeler (BGR)	

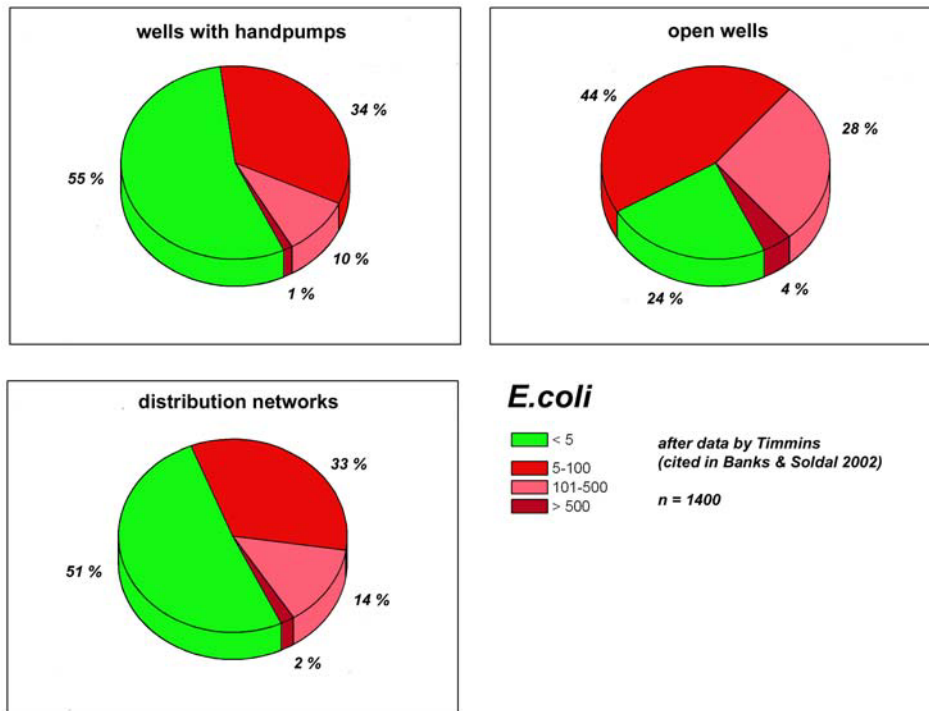
Second Day

03.08.2005			Chairman
9:00 – 9:30	Recitation, Summary 1 st day, Overview 2 nd day	Mr. Thomas Himmelsbach (BGR)/ Mr. Nadjib Yussufi (InWEnt)	Mr. Kamaludin Nezami, Dep. Minister for Energy and Water (9:00 - 12:00)
9:30 – 10:15	Key Issues of Monitoring and Evaluation (M&E) in the Water Sector (25 min)	Mr. Werner Klinger (MEW/GTZ)	
10:15 – 10:45	Tea-Break		
10:45 – 12:00	Critical Issues of Groundwater based Water Supply and Water Resource Management Experience from: - Kabul (20 min) - Kunduz River Basin Program	CAWSS Kabul/ Mr. Bernd Fischäß (Beller/KFW) Mr. Frank Riedmann (GAA) Jelle Beekma (EU Teamleader Kunduz River Basin Authority/ EU/GAA)	
12:00 – 13:30	Lunch break		
13:30 – 14:00	Water Resources Management	Mr. Yussof Pashtoun (Dep. Minister for Urban Development and Housing)	
14:00 – 15:00	Capacity Building and Training: Awareness Rising for Water Resource Management to Mitigate Natural Disaster	Mr. Arez / Mr. Kai Yamaguchi (InWEnt)	Mr. Yussof Pashtoun, Dep. Minister for Urban Development and Housing (14:00 - 17:00)
15:00 – 16:00	Discussion - Recommendations from Workshop: Needs, Options and Next Steps in Enhancing the Groundwater Monitoring, Managing and Awareness Rising Capacity (Proposals)	Facilitator: Mr. Jallalzada Board members: <ul style="list-style-type: none"> • MMI • MEW • MoUDH • BGR/GTZ Moderator: Mr. Nadjib Yussufi	
16:00 – 17:00	Wrap-up and Closing Session Summary / Preparation of Proposals	All	

Annexe 2 : Représentation schématique d'un karez



Annexe 3 : Proportion d'ouvrages contaminés par *Escherichia coli* à Kaboul en 2002, pour n=1400 échantillons, valeurs données en UFC/100ml (Unité Formant Colonie)



Annexe 4 : Valeurs utilisées pour les entrées du modèle

Valeurs moyennes pour travailler au pas de temps mensuel en régime permanent (années 60)

Type de flux	Structure représentative	Fonction	Unité	Valeur	Commentaires
Eaux souterraines	Aquifères limitrophes Paghman + Kaboul	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /mois	735487	
	Aquifère limitrophe Logar	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /mois	223008	
Infiltration efficace	Toute la zone sauf bordures des fleuves	FLAE "***	m ³ /m ² /mois	0.0017	Valeurs basées sur l'indice de drainage de Hénin-Aubert
	Bordures des fleuves	FLAE "***	m ³ /m ² /mois	0.0023	"
Infiltration des eaux de fonte des neiges	Bordures externes	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /mois	887500	En considérant 10,65*10 ⁶ m ³ /an disponible
Prélèvements 1960-70 eau de consommation	5 Puits	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /mois	389333	En considérant 320000 habitants et une consommation de 40L/hab/j
Part des eaux souterraines à l'écoulement à l'exutoire	Cours inférieur du Kaboul	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /mois	1416667	En considérant cette participation à 17*10 ⁶ m ³ /an

Valeurs moyennes pour travailler au pas de temps annuel en régime permanent (années 60)

Type de flux	Structure représentative	Fonction	Unité	Valeur	Commentaires
Eaux souterraines	Aquifères limitrophes Paghman + Kaboul	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	8948427	
	Aquifère limitrophe Logar	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	2713269	
Infiltration efficace	Toute la zone sauf bordures des fleuves	FLAE "***	m ³ /m ² /an	0.0205	Valeurs basées sur l'indice de drainage de Hénin-Aubert
	Bordures des fleuves	FLAE "***	m ³ /m ² /an	0.02708378	"
Infiltration des eaux de fonte des neiges	Bordures externes	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	10650000	En considérant 10,65*10 ⁶ m ³ /an disponible
Prélèvements 1960-70 eau de consommation	5 Puits	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	4672000	En considérant 320000 habitants et une consommation de 40L/hab/j
Part des eaux souterraines à l'écoulement à l'exutoire	Cours inférieur du Kaboul	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	17000000	En considérant cette participation à 17*10 ⁶ m ³ /an

Valeurs moyennes pour travailler au pas de temps annuel en régime permanent (année 2005)

Type de flux	Structure représentative	Fonction	Unité	Valeur	Commentaires
Eaux souterraines 2000	Aquifères limitrophes Paghman + Kaboul	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	7498491.86	
	Aquifère limitrophe Logar	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	2252835.26	
Infiltration efficace 2000	Toute la zone sauf bordures des fleuves	FLAE "***"	m ³ /m ² /an	0	
	Bordures des fleuves	FLAE "***"	m ³ /m ² /an	0	
Infiltration des eaux de fonte des neiges 2000	Bordures externes	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	0	
Prélèvements 2000 eau de consommation	Zone de la ville	KNOT "/"	m ³ /liste de nœuds /an	43800000	En considérant 3*10 ⁶ habitants et une consommation de 40L/hab/j

Valeurs pour travailler au pas de temps annuel en régime transitoire (années 60 et 2005)

Type de flux	Structure représentative	Fonction	Unité	Valeur	Commentaires
Eaux souterraines	Aquifères limitrophes Paghman + Kaboul 32 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	279638	
	Aquifère limitrophe Logar 10 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	271327	
Infiltration efficace	Toute la zone 2396 éléments	FLAE	m ³ /m ² /an	0.027	En considérant 100% d'infiltration de la pluie efficace
Infiltration des eaux de fonte des neiges	Bordures externes 161 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	66149	En considérant 10,65*10 ⁶ m ³ /an disponible
Prélèvements 1960-70 eau de consommation	5 Puits	KNOT	m ³ /nœud /an	934400	En considérant 320000 habitants et une consommation de 40L/hab/j
Eaux souterraines 2005	Aquifères limitrophes Paghman + Kaboul 32 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	234328	
	Aquifère limitrophe Logar 10 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	225284	
Infiltration efficace 2005	Toute la zone 2396 éléments	FLAE	m ³ /nœud /an	0	
Infiltration des eaux de fonte des neiges 2005	Bordures externes 161 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	0	
Prélèvements 2005 eau de consommation	Zone de la ville 1079 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	40593	En considérant 3*10 ⁶ habitants et une consommation de 40L/hab/j
Part des eaux souterraines à l'écoulement à l'exutoire	Cours inférieur du Kaboul soit 15 nœuds	KNOT	m ³ /nœud /an	1133333	En considérant cette participation à 17*10 ⁶ m ³ /an

Valeurs pour travailler au pas de temps mensuel en régime transitoire (années 60)

Eaux souterraines

KNOT Logar 10 nœuds	Volume en m ³ /nœud
Janvier	22166
Février	22166
Mars	23247
Avril	23247
Mai	23247
Juin	22166
Juillet	22166
Août	21625
Septembre	21625
Octobre	21625
Novembre	22166
Décembre	22166

KNOT Paghman+Kaboul 32 nœuds	Volume en m ³ /nœud
Janvier	22851
Février	22851
Mars	23915
Avril	23915
Mai	23915
Juin	22851
Juillet	22851
Août	22319
Septembre	22319
Octobre	22319
Novembre	22851
Décembre	22851

**Prélèvements
1960-70
eau de
consommation**

KNOT 5 puits	Volume en m ³ /nœud
Janvier	77867
Février	77867
Mars	77867
Avril	77867
Mai	77867
Juin	77867
Juillet	77867
Août	77867
Septembre	77867
Octobre	77867
Novembre	77867
Décembre	77867

**Infiltration des
eaux
de fonte des
neiges**

KNOT 161 nœuds	Volume en m ³ /nœud avec 10,65*10 ⁶ m ³ disponible
Janvier	0
Février	0
Mars	22050
Avril	22050
Mai	22050
Juin	0
Juillet	0
Août	0
Septembre	0
Octobre	0
Novembre	0
Décembre	0

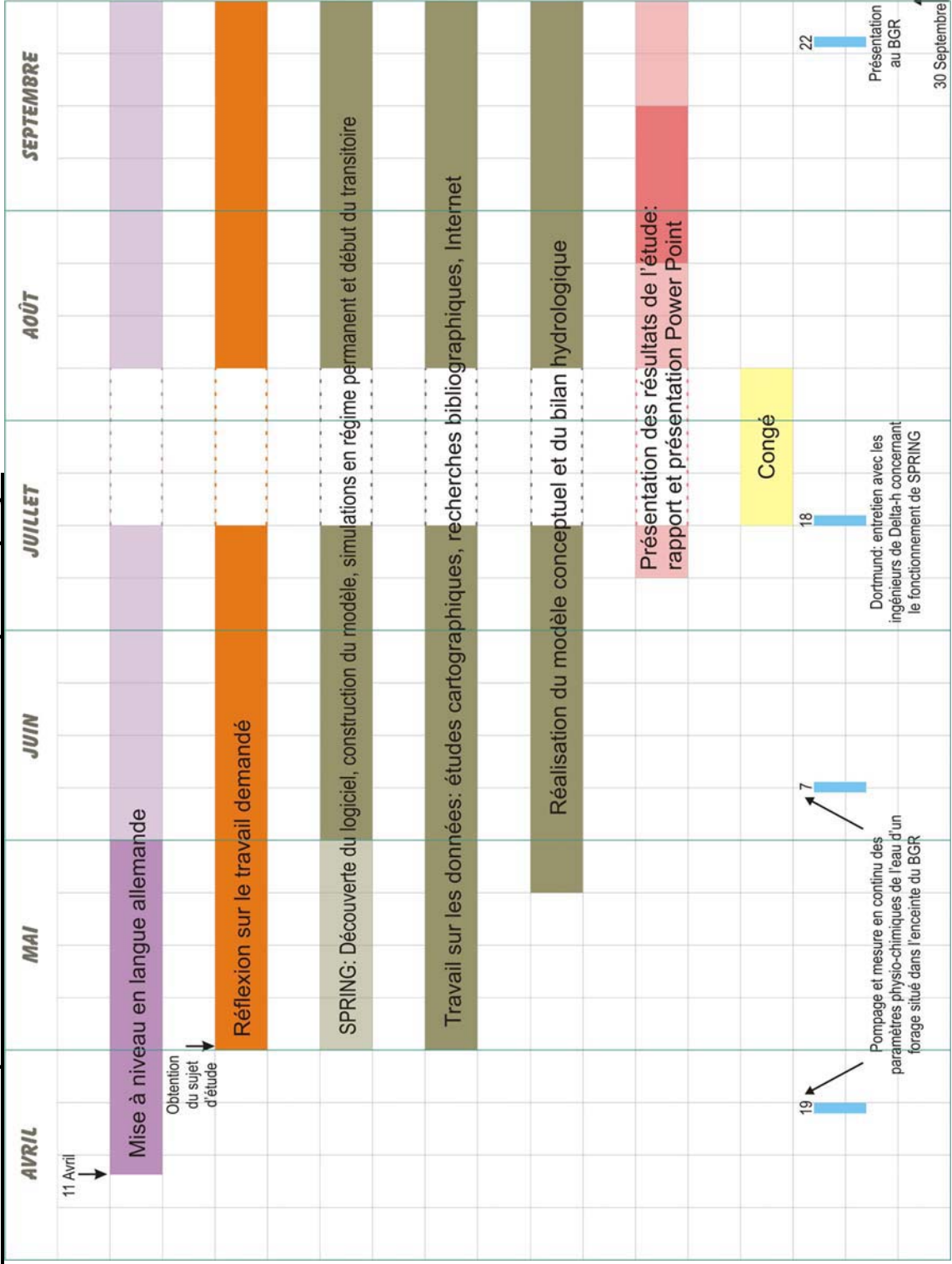
**Infiltration
efficace**

FLAE 2396 éléments	Volume en m ³ avec une infiltration de 100% de la pluie efficace
Janvier	0.0054
Février	0.0054
Mars	0.0054
Avril	0.0054
Mai	0
Juin	0
Juillet	0
Août	0
Septembre	0
Octobre	0
Novembre	0
Décembre	0.0054

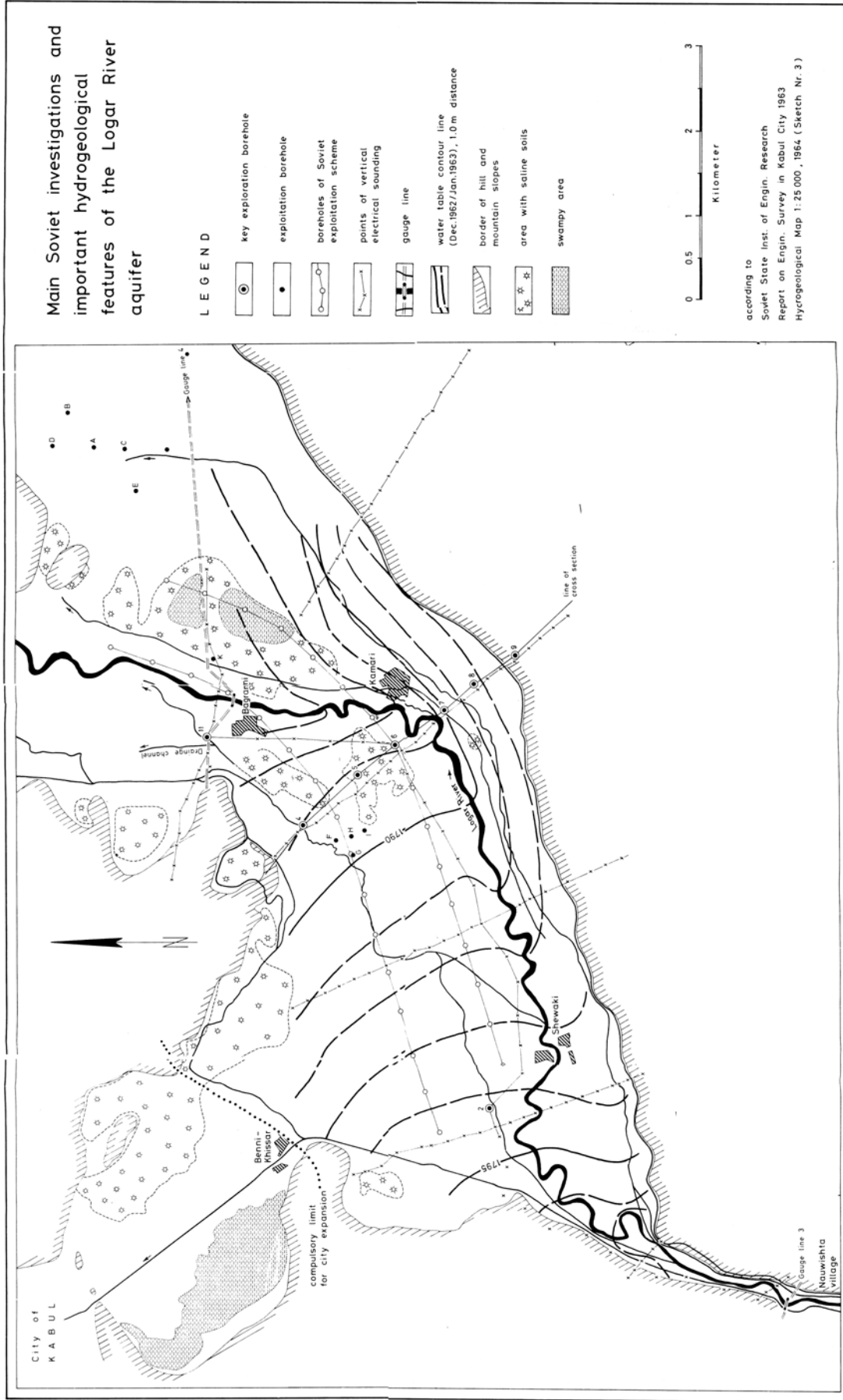
Table des annexes

Annexe 1 : Programme de la conférence des 2 et 3 août 2005 à Kaboul	91
Annexe 2 : Représentation schématique d'un kareze	93
Annexe 3 : Proportion d'ouvrages contaminés par <i>Escherichia coli</i> à Kaboul en 2002, pour n=1400 échantillons, valeurs données en UFC/100ml (Unité Formant Colonie)	93
Annexe 4 : Valeurs utilisées pour les entrées du modèle	94
Annexe 5 : Gestion du temps de travail et des différentes étapes du projet	98
Annexe 6a : Zone d'investigations des années 62-63 dans la vallée du Logar	99
Annexe 6b : Zones d'investigations des années 62-63 dans les vallées du Kaboul et du Paghman	100
Annexe 7 : Localisation des stations de jaugeage des cours d'eau	101
Annexe 8 : Etendue de la ville et zones situées au dessus de 1829m (en jaune) d'après une carte de 2002	102
Annexe 9a: Températures moyennes annuelles	103
Annexe 9b : Températures moyennes mensuelles	103
Annexe 11 : Cumul annuel des précipitations	104
Annexe 12a : Précipitations moyennes mensuelles	105
Annexe 12b: Diagramme de Whisker montrant l'étalement des valeurs possibles de précipitations mensuelles	105
Annexe 13: Couverture moyenne en cm et nombre moyen de jours de neige en hiver à Kaboul	106
Annexe 14a: Calcul de la pluie efficace à partir de la formule d'Ivanov	107
Annexe 14b: Calcul de la pluie efficace à partir de la formule de Turc	107
Annexe 15: Etude mensuelle des directions et vitesses des vents	108
Annexe 16: Piézométrie dans le quartier de Sher-I-Nau dans les années 62-63	109
Annexe 17 : Calculs des écoulements souterrains entrants dans la zone d'étude	110
Annexe 18: Valeurs de porosité efficace données pour différents types de sédiments	111

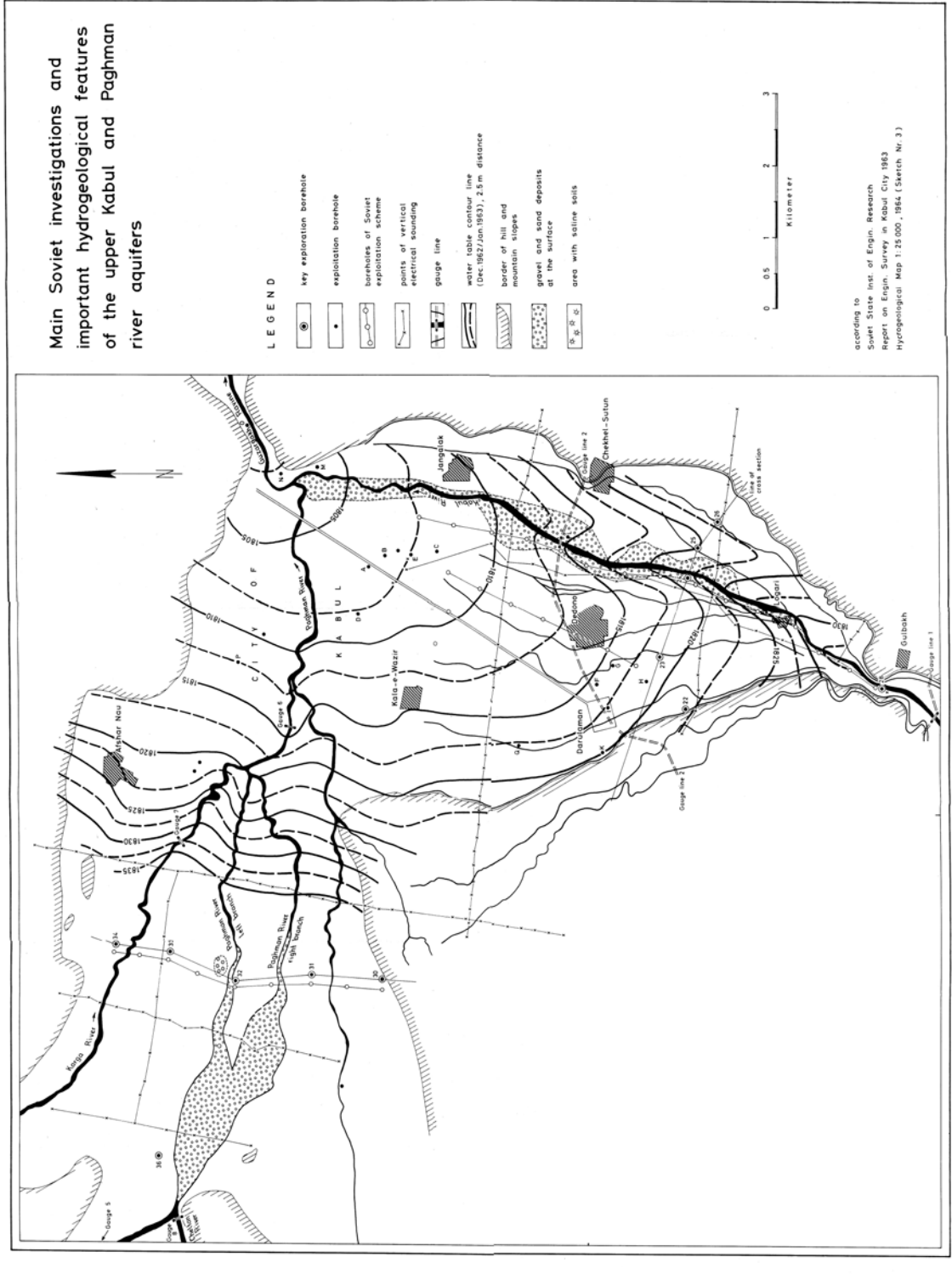
Annexe 5 : Gestion du temps de travail et des différentes étapes du projet



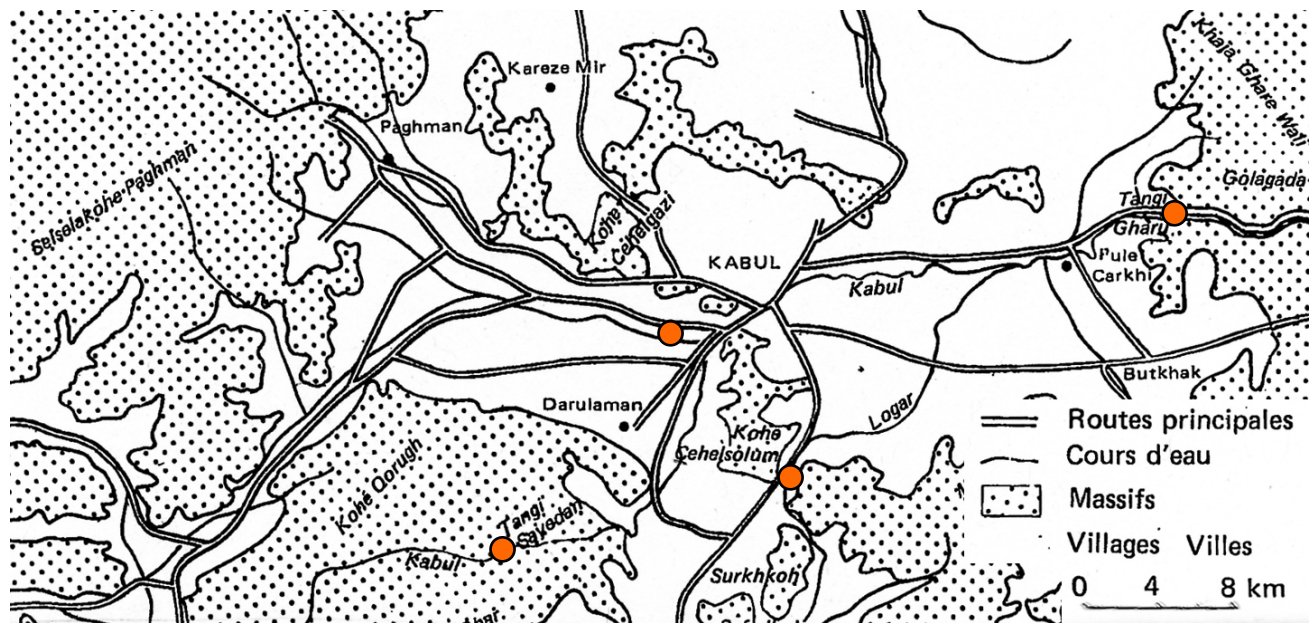
Annexe 6a : Zone d'investigations des années 62-63 dans la vallée du Logar



Annexe 6b : Zones d'investigations des années 62-63 dans les vallées du Kaboul et du Paghman



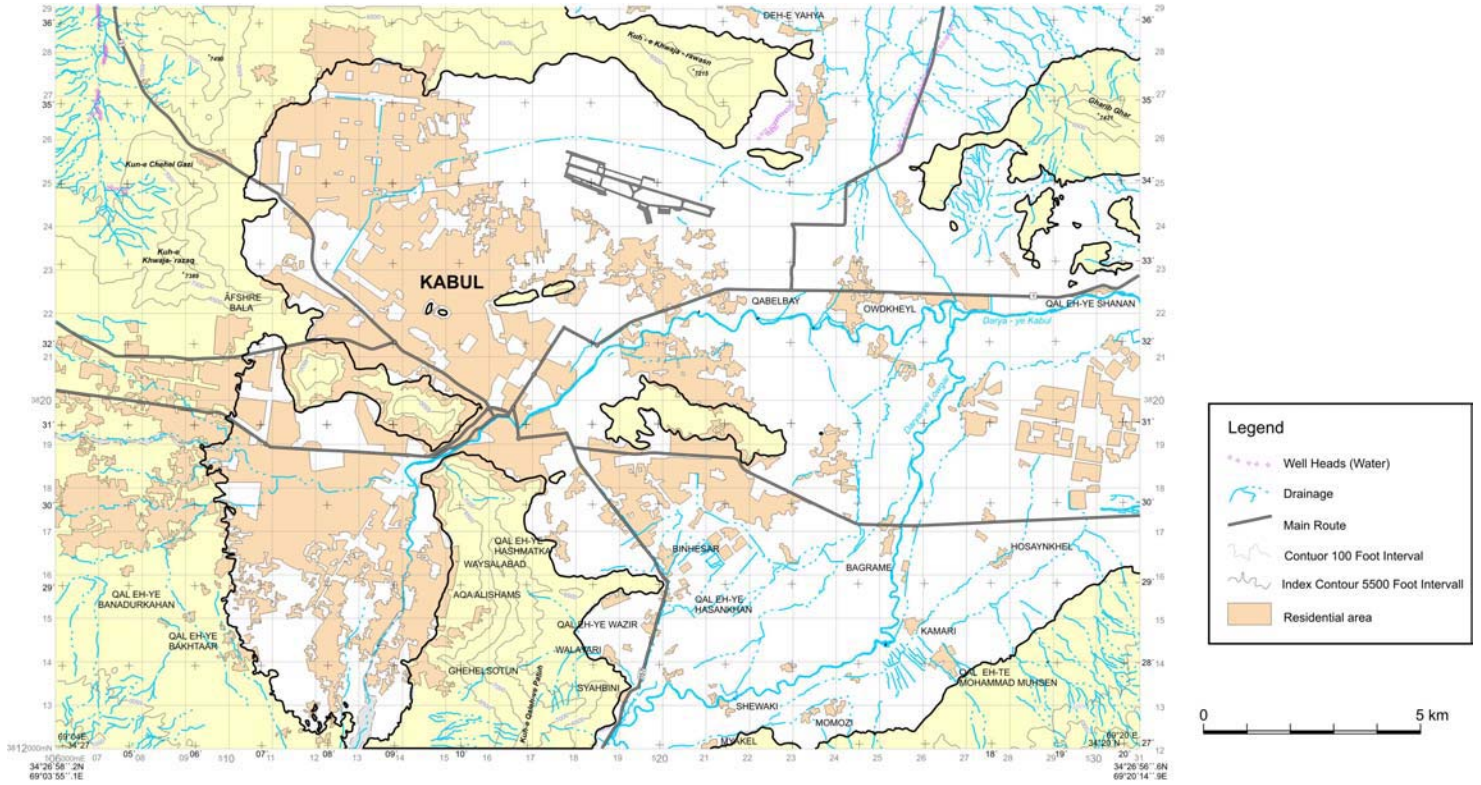
Annexe 7 : Localisation des stations de jaugeage des cours d'eau



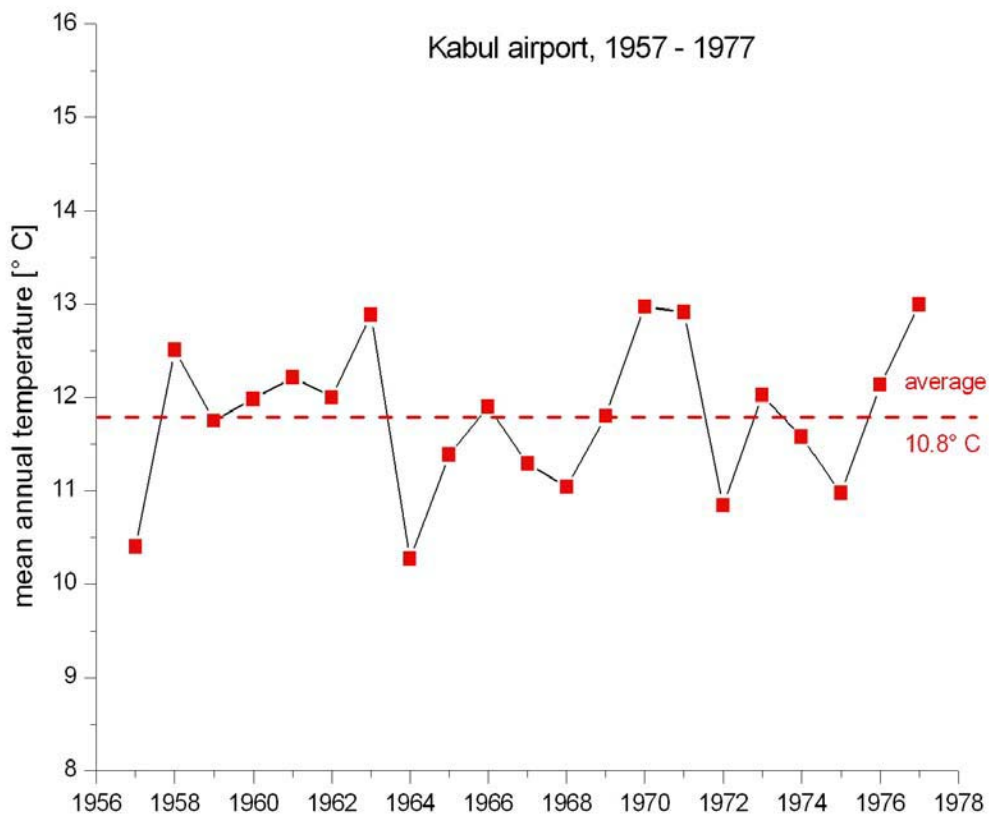
● Stations de jaugeage des cours d'eau :

- Tangi Saydan, 1850 m, sur le Kaboul en amont de la zone d'étude ;
- Pule Sokhta, 1805 m, sur le Paghman peu avant la confluence Kaboul-Paghman ;
- Sange Nawesta, 1805 m, sur le Logar à l'entrée dans la plaine de Kaboul ;
- Tangi Gharu, 1770 m, au niveau de l'exutoire du bassin.

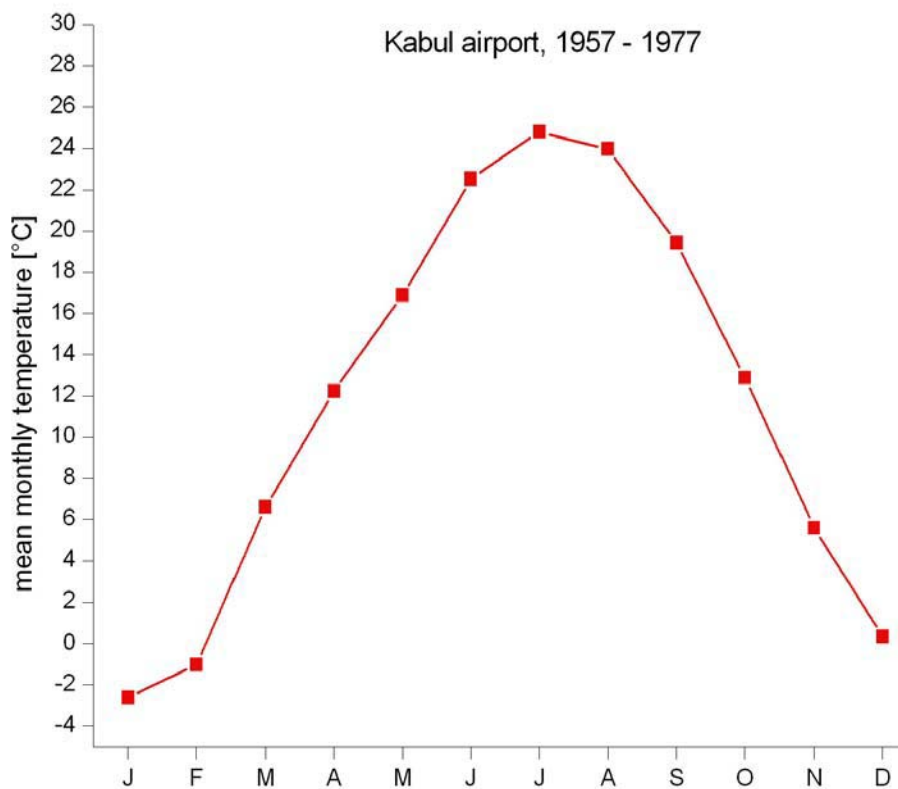
Annexe 8 : Etendue de la ville et zones situées au dessus de 1829m (en jaune)
d'après une carte de 2002

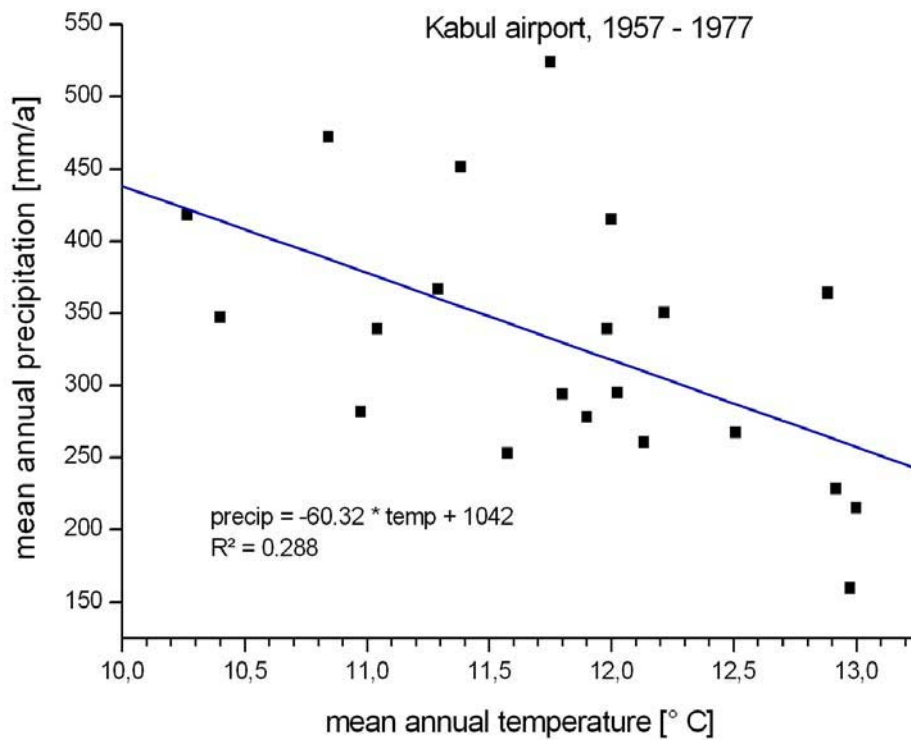
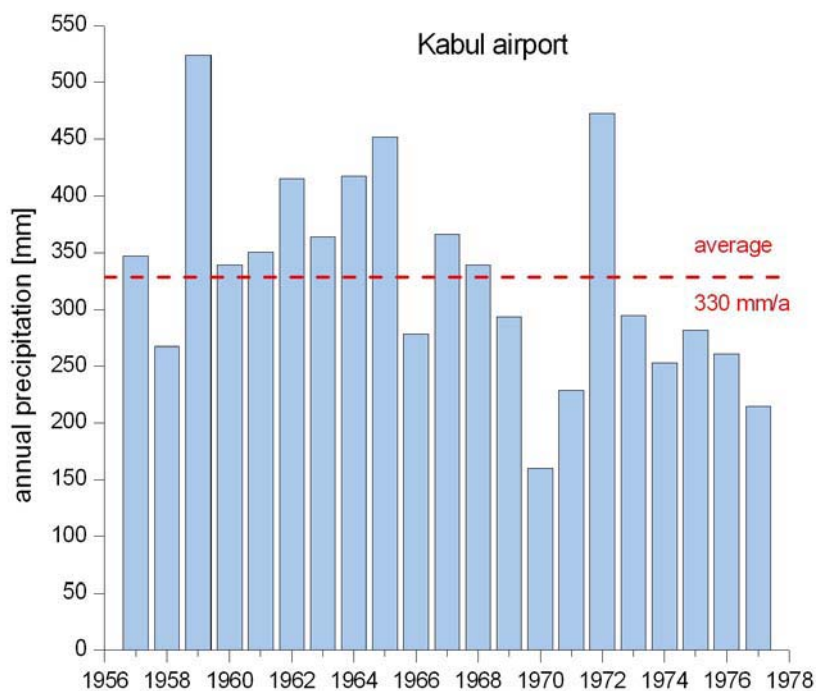


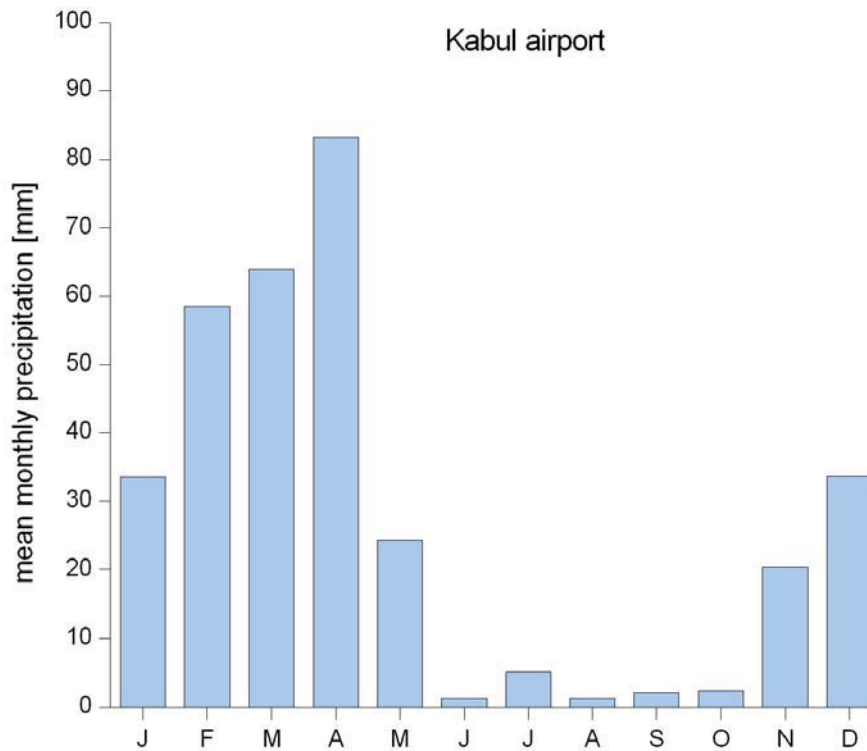
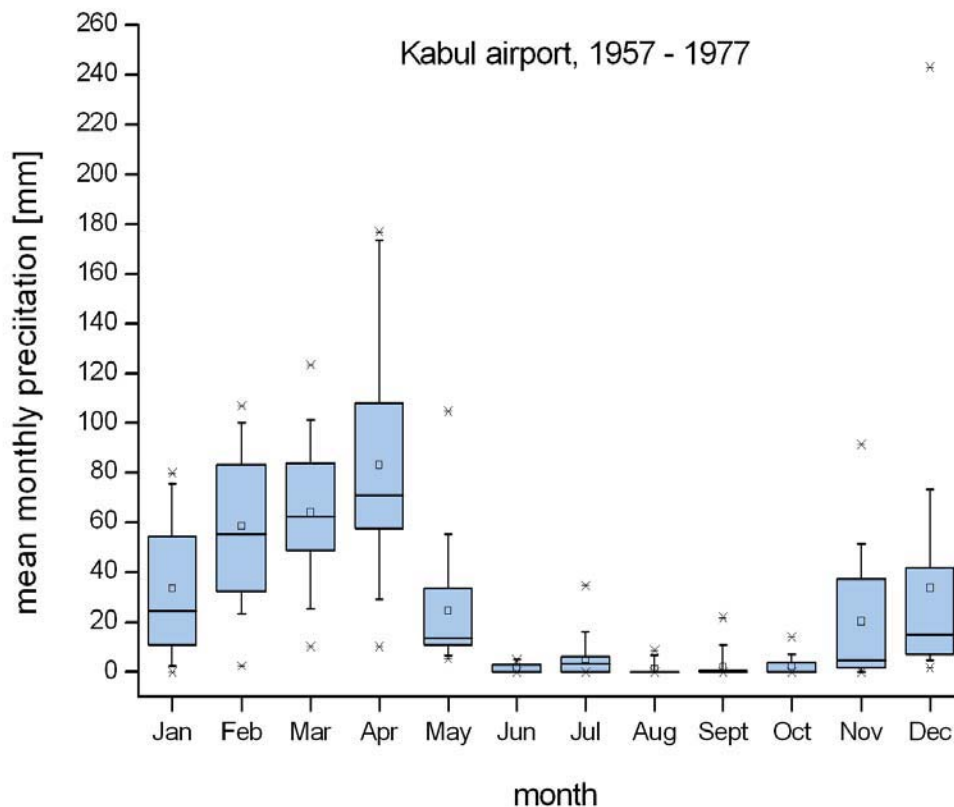
Annexe 9a: Températures moyennes annuelles



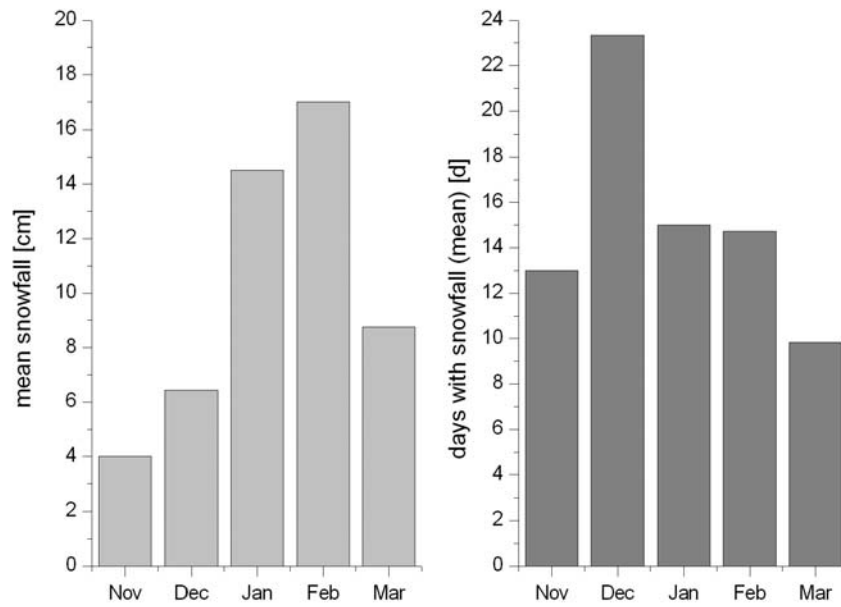
Annexe 9b : Températures moyennes mensuelles



Annexe 10 : Précipitations moyennes annuelles en fonction de la température moyenne annuelle**Annexe 11 : Cumul annuel des précipitations**

Annexe 12a : Précipitations moyennes mensuelles**Annexe 12b: Diagramme de Whisker montrant l'étalement des valeurs possibles de précipitations mensuelles**

Annexe 13: Couverture moyenne en cm et nombre moyen de jours de neige en hiver à Kaboul



Annexe 14a: Calcul de la pluie efficace à partir de la formule d'Ivanov

ETP Ivanov

Année standard	Pluies en mm	ETP Ivanov en mm	Pluie efficace en mm
Décembre	33.61	28.96	4.65
Janvier	33.5	19.84	13.66
Février	58.55	20.87	37.68
Mars	64.01	35.19	28.82
Avril	83.17	51.86	31.31
Mai	24.33	77.19	0
Juin	1.28	139.1	0
Juillet	5.18	147.29	0
Août	1.21	147.61	0
Septembre	2.08	132.53	0
Octobre	2.37	93.2	0
Novembre	20.3	46.34	0
Cumul annuel	329.59	939.98	116.12

Annexe 14b: Calcul de la pluie efficace à partir de la formule de Turc

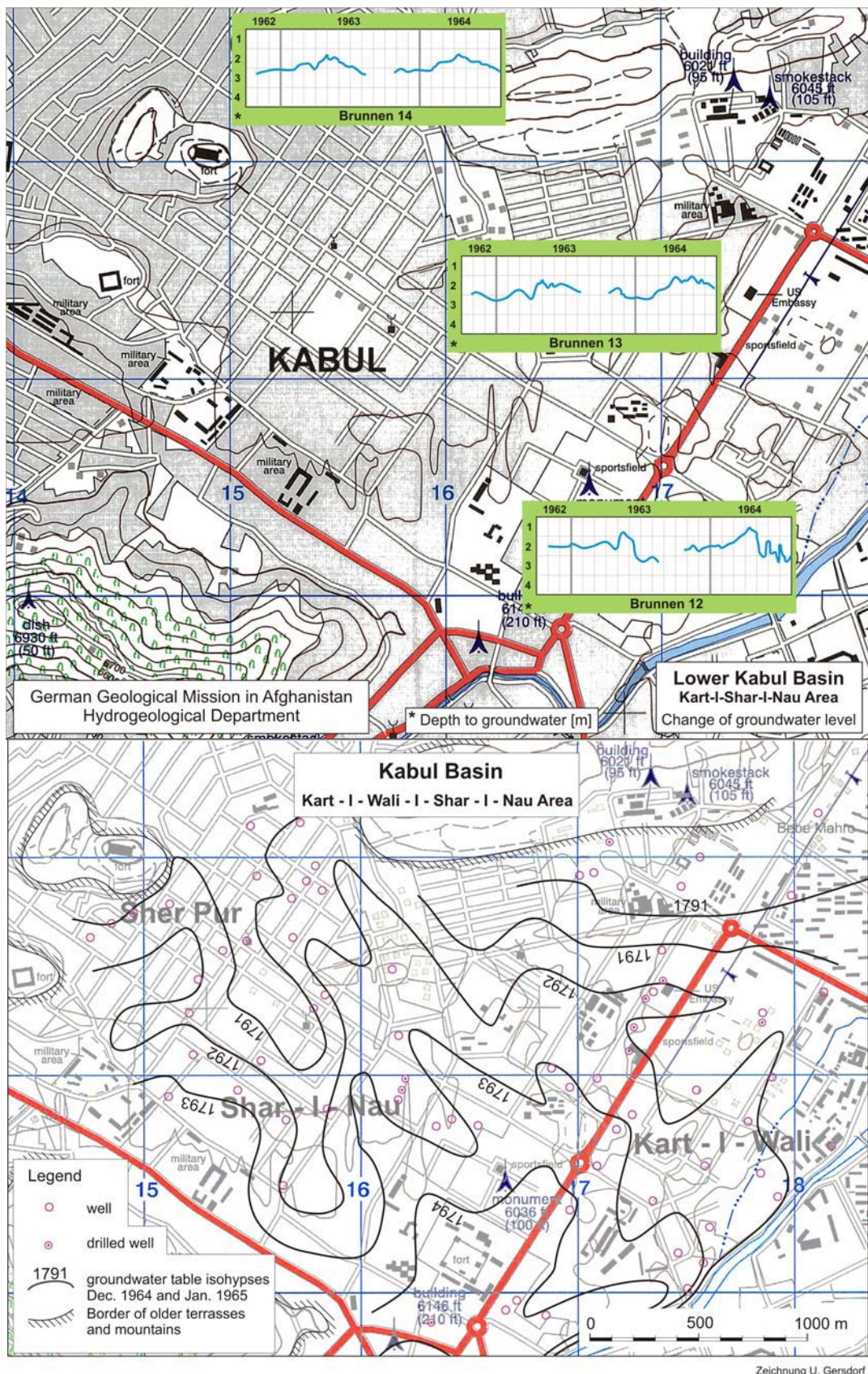
ETR Turc

Années	Pluviométrie en mm	Température en °C	ETR Turc en mm	Différence (P-ETR) mm	Différence (P-ETR) m
1957	347.1	10.40	314.60	32.50	0.03250
1958	267.2	12.51	261.83	5.37	0.00537
1959	523.9	11.75	427.38	96.52	0.09652
1960	339.4	11.98	317.18	22.22	0.02222
1961	350.6	12.22	326.46	24.14	0.02414
1962	415.5	12.00	369.22	46.28	0.04628
1963	364.2	12.88	339.68	24.52	0.02452
1964	418.1	10.27	357.39	60.71	0.06071
1965	451.5	11.38	385.70	65.80	0.06580
1966	278.1	11.90	269.30	8.80	0.00880
1967	366.6	11.29	332.73	33.87	0.03387
1968	339.4	11.04	312.67	26.73	0.02673
1969	293.8	11.80	281.64	12.16	0.01216
1970	159.9	12.98	164.27	-4.37	-0.00437
1971	228.3	12.92	228.57	-0.27	-0.00027
1972	472.6	10.84	391.89	80.71	0.08071
1973	295	12.03	283.33	11.67	0.01167
1974	253	11.58	247.62	5.38	0.00538
1975	281.7	10.98	269.39	12.31	0.01231
1976	260.8	12.13	255.52	5.28	0.00528
1977	215	13.00	216.56	-1.56	-0.00156
Moyenne annuelle	329.6047619	11.80321429	302.52	27.08	0.02708

Annexe 15: Etude mensuelle des directions et vitesses des vents

Wind direction	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Speed [m/s]	
Month	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	[d]	max	average
January	2.5	2.7	2	2	8	6	2	1.5	4.3	18	3.4
February	1.8	2	0.8	2.2	10.3	3	3	1	3.5	16	3.2
March	3.3	1.5	1.2	2.8	4.8	3.5	4.3	2.8	6.8	24	3.1
April	4.5	2.8	1.6	1.8	4	1.5	3.5	3.4	6.9	16	3.3
May	2.7	3.8	2.6	3.7	6.5	1.8	2.7	3.4	3.7	22	3.8
June	7.2	3.2	0.5	2.6	3	1.8	4.2	3.4	4	16	3
July	7.5	2.7	1.2	1.8	3.6	0.2	2	3.3	8.7	18	1.3
August	6.3	1.5	1.8	2	2.8	0.5	1.2	6.4	8.5	16	1.1
September	5.4	2.4	2.5	2	3.2	0.5	2.2	4.8	7	10	1.1
October	5.2	1.6	2	2.2	4.7	1.8	1.6	6.4	5.5	18	1.3
November	5	2	2.3	1.7	5.6	0.8	3.8	5.6	4.2	14	1.5
December	2.8	2.6	1	3.1	8.5	2.2	3	2.8	5	16	1.9
Days per year	53	30	20	28	64	24	34	45	67		
% of the year	14.5	8.2	5.5	7.7	17.5	6.6	9.3	12.3	18.4		

Annexe 16: Piézométrie dans le quartier de Sher-I-Nau dans les années 62-63



Annexe 17 : Calculs des écoulements souterrains entrants dans la zone d'étude

Logar 1963	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	43	2700	0.090	232469	2.83
Basse eaux	40	2700	0.083	216251	2.63
Normal	41	2700	0.086	221657	2.70
Moyenne pondérée			0.086	223008	2.71

Logar 2005	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	36	2700	0.075	194626	2.37
Basse eaux	33	2700	0.069	178407	2.17
Normal	34	2700	0.071	183813	2.24
Moyenne pondérée			0.071	185165	2.25

Kaboul 1963	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	43	4063	0.145	374956	4.56
Basse eaux	40	4063	0.135	348797	4.24
Normal	41	4063	0.138	357516	4.35
Moyenne pondérée			0.139	359696	4.38

Kaboul 2005	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	36	4063	0.121	313917	3.82
Basse eaux	33	4063	0.111	287757	3.50
Normal	34	4063	0.114	296477	3.61
Moyenne pondérée			0.115	298657	3.63

Paghman 1963	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	47	4500	0.151	390324	4.75
Basse eaux	44	4500	0.141	365410	4.45
Normal	45	4500	0.144	373715	4.55
Moyenne pondérée			0.145	375791	4.57

Paghman 2005	Epaisseur en m	Largeur mesurée en m	Débit en m ³ /s	m ³ /mois	Millions m ³ /an
Haute eaux	40	4500	0.128	332191	4.04
Basse eaux	37	4500	0.119	307276	3.74
Normal	38	4500	0.122	315581	3.84
Moyenne pondérée			0.123	317657	3.86

Annexe 18: Valeurs de porosité efficace données pour différents types de sédiments**Valeurs et facteurs de la porosité efficace**

Les valeurs de la porosité efficace sont données dans les tableaux 15 et 16.

**Tableau 15 - Quelques caractéristiques de sédiments meubles.
D'après documents de l'U.S. Geological Survey.**

Types de sédiments	d_{10} mm	n %	n_e %	K m/s
Gravier moyen	2,5	45	40	$3 \cdot 10^{-1}$
Sable gros	0,250	38	34	$2 \cdot 10^{-3}$
Sable moyen	0,125	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$
Sable fin	0,09	40	28	$7 \cdot 10^{-4}$
Sable très fin	0,045	40	24	$2 \cdot 10^{-5}$
Sable silteux	0,005	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$
Silt	0,003	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$
Silt argileux	0,001	38	-	* $1 \cdot 10^{-9}$
Argile	0,0002	47	-	* $5 \cdot 10^{-10}$

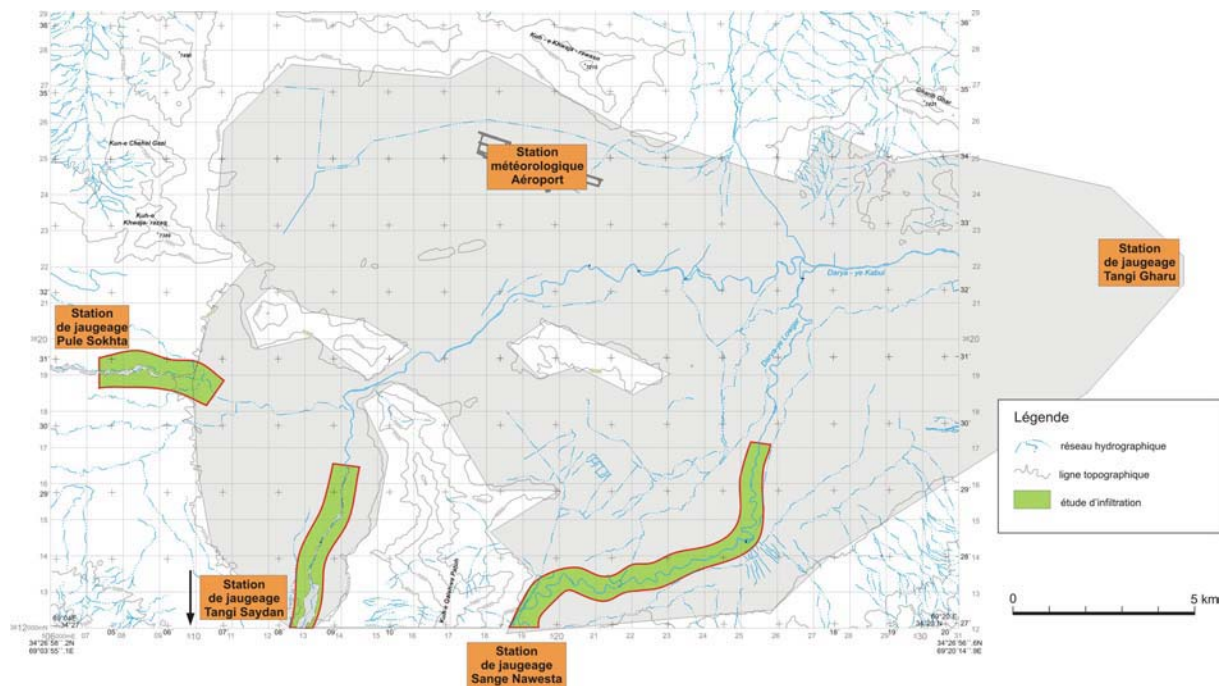
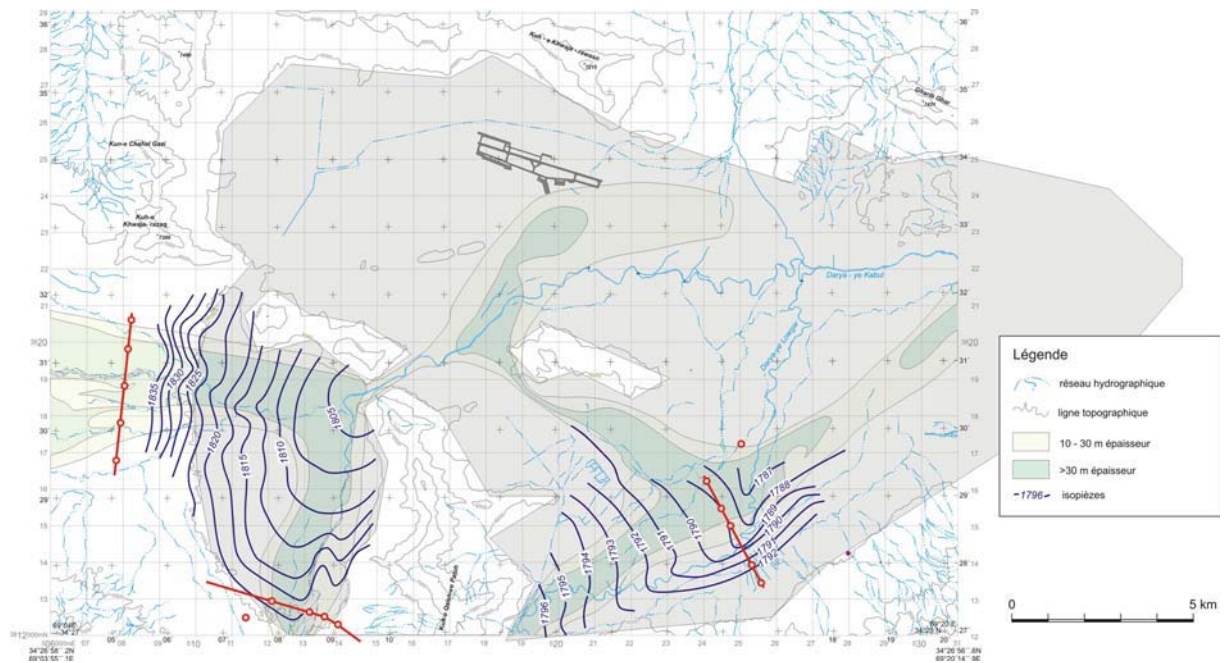
*Valeurs calculées

**Tableau 16- Valeurs de la porosité efficace moyenne
pour les principaux réservoirs**

Types de réservoirs	Porosité efficace %	Types de réservoirs	Porosité efficace %
Gravier gros	30	Sable gros + silt	5
Gravier moyen	25	Silt	2
Gravier fin	20	Vases	0,1
Gravier + sable	15 à 25	Calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	Craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0,1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	Schistes	0,1 à 2

5

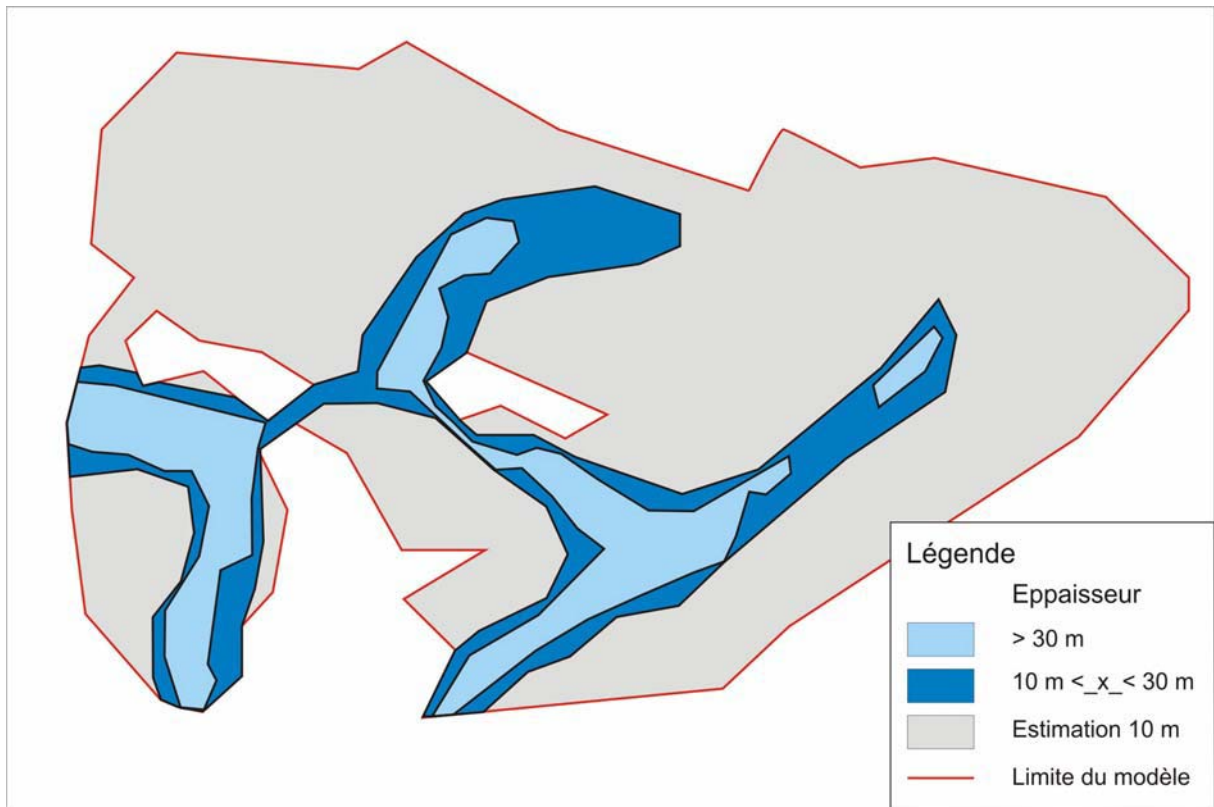
Annexe 19 : Adéquation entre les données disponibles concernant les eaux de souterraine et les eaux de surface avec les limites du modèle



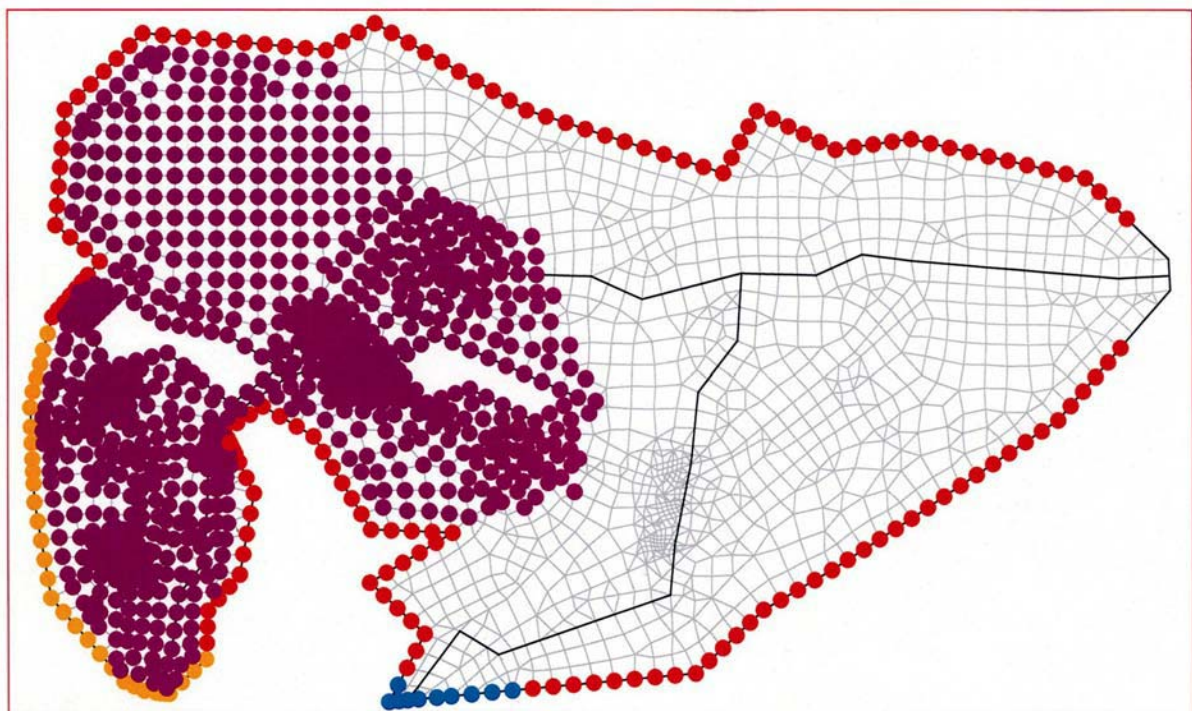
Annexe 20: Les structures du modèle**Annexe 21: Fonctions utilisées dans le programme pour entrer les valeurs des différents paramètres**

Identifiant	Paramètre	Affectation aux Eléments ou au Noeuds	unité
KWER	Conductivité hydraulique	E	m/s
MAEC	Epaisseur	E	m
SPEI	Coefficient d'emmagasinement	E	sans
PORO	Porosité	N	sans
POTE	Potentiel	N	m
FLAE	Taux d'infiltration	E or area	m ³ /aire/UT ou "*" m ³ /m ² /UT
KNOT	Taux d'écoulement entrant ou sortant	N	m ³ /N/UT ou "/" m ³ /list/UT
RAND	Taux d'écoulement entrant ou sortant le long d'une ligne	N	m ³ /m/UT
BILK et BILE	Bilan de masse	N ou E	sans
MXKI et MXKE	Limite de drainage le long d'une ligne	N ou E	m ³ /m/UT
GELA	Niveau du sol	N	m
UNDU	Couche imperméable	N	m

Annexe 22: Zonage des épaisseurs



Annexe 23: Visualisation des nœuds auxquels la fonction KNOT peut être attribuée



Annexe 24: Formats utilisés dans les fichiers texte**Exemple de format texte utilisé pour construire et modifier le modèle**

KNOT k 3 :

```

1000000.00000 / 3- 12, 14- 18, 24, 27- 101, 131- 169,+
                171- 172, 175, 179- 195, 519- 522, 1147, 1151,+
                1166, 1705, 1710, 1727, 2110,
735487.00000 / 102- 125, 127- 130, 301, 326- 327, 1066,
223008.00000 / 170, 173- 174, 176- 178, 294, 523, 575- 576,
-389333.00000 / 408, 654, 1134, 1189- 1190,

```

KWER e 3 :

```

0.00050 1- 1858, 1860- 2392, 2394- 2398,

```

LERA ks3 :

```

97200.00000 123, 208, 210, 209, 212- 213, 211, 215, 214,+
            216, 218- 219, 217, 220, 1714, 1897, 221, 1894,+
            1712- 1713, 222, 224- 226, 223, 228, 1729, 227,+
            1731, 1989, 229, 1737, 231, 1741, 232- 233, 230,+
            524- 525, 234, 236- 237, 235, 239- 242, 238,+
            244- 245, 243, 247- 250, 252- 254, 251, 256,+
            257, 255, 259- 260, 258, 262- 271, 261, 272,+
            273, 22,
97200.00000 196, 198, 197, 200- 201, 199, 203, 202, 205,+
            206, 204, 207, 107,
97200.00000 246, 275- 277, 274, 279- 281, 278, 283- 285,+
            1801, 282, 1803, 286, 1807, 533, 1821, 548, 1824,+
            549, 1830, 2079, 552, 1800, 1- 2, 288, 287,+
            527- 532, 289- 290, 299- 300, 291, 293, 292,+
            295- 298, 294,

```

MAEC e 2 :

```

20.00000 2395- 2398,
30.00000 2394,
40.00000 2321- 2392,
30.00000 2317- 2320,

```

Exemple du format texte utilisé pour travailler en régime transitoire

Modelisation of the groundwater flow in the area of the Kabul city
Hydrogeology of the Kabul basin - B.1.17 - BGR Hannover GERMANY
Test 0107-1156

ZEITEINHEIT MENG MONAT
ZEITEINHEIT ZEIT MONAT

ZEIT
1.0

KNOT

```

301 22851 102 22851 103 22851 104 22851 105 22851
106 22851 107 22851 108 22851 109 22851 110 22851
111 22851 112 22851 113 22851 114 22851 115 22851
116 22851 117 22851 118 22851 119 22851 120 22851
121 22851 122 22851 123 22851 124 22851 125 22851
326 22851 127 22851 128 22851 129 22851 130 22851
327 22851 1066 22851

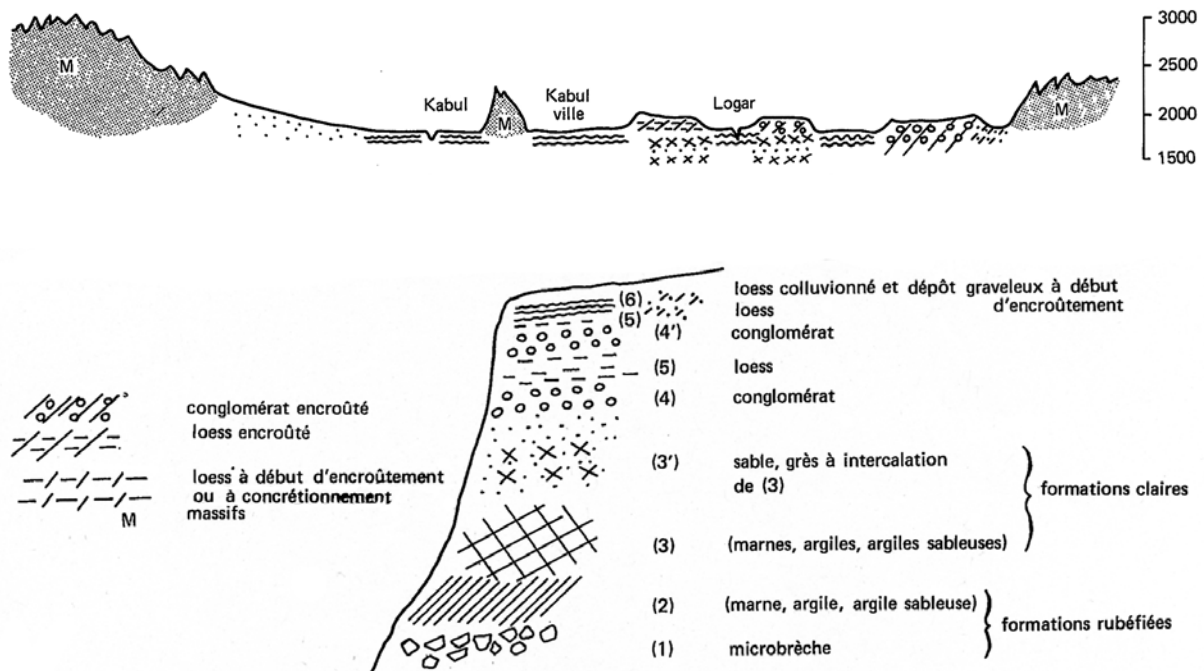
```

170	22166	173	22166	174	22166	176	22166	177	22166
178	22166	294	22166	523	22166	575	22166	576	22166
408	77867	654	77867	1134	77867	1190	77867	1189	77867

FLAE

1	0.0041	2	0.0041	3	0.0041	4	0.0041	5	0.0041
6	0.0041	7	0.0041	8	0.0041	9	0.0041	10	0.0041
11	0.0041	12	0.0041	13	0.0041	14	0.0041	15	0.0041
16	0.0041	17	0.0041	18	0.0041	19	0.0041	20	0.0041
21	0.0041	22	0.0041	23	0.0041	24	0.0041	25	0.0041
26	0.0041	27	0.0041	28	0.0041	29	0.0041	30	0.0041
31	0.0041	32	0.0041	33	0.0041	34	0.0041	35	0.0041
36	0.0041	37	0.0041	38	0.0041	39	0.0041	40	0.0041
41	0.0041	42	0.0041	43	0.0041	44	0.0041	45	0.0041
46	0.0041	47	0.0041	48	0.0041	49	0.0041	50	0.0041
51	0.0041	52	0.0041	53	0.0041	54	0.0041	55	0.0041

Annexe 25: Coupe géologique dans le bassin de Kaboul issue d'un rapport de J.Pias (réf 4)



Annexe 26: Surface piézométrique obtenue lors d'un prélèvement considérant 3 millions d'habitants à Kaboul et une bonne infiltration des eaux de surface ($K_{moy} = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s)

