



**ROYAUME DU MAROC**

**INSTITUT AGRONOMIQUE ET VETERINAIRE HASSAN II**

**RABAT**

---

**MEMOIRE DE TROISIEME CYCLE**

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en

**Génie Rural**

---

**UTILISATION DES SYSTEMES D'INFORMATION  
GEOGRAPHIQUE EN HYDROGEOLOGIE EN VUE DE  
L'ELABORATION D'UN OUTIL DE GESTION DES RESSOURCES  
EN EAU DU BASSIN DE GUELMIM**

Présenté et Soutenu Publiquement Par

**Mlle NAJLAE NASER**

Devant le Jury composé de

|                      |          |                       |           |                            |
|----------------------|----------|-----------------------|-----------|----------------------------|
| <b>Président</b>     | <b>:</b> | <b>Pr. DEBBARH</b>    | <b>A.</b> | <b>(DFC)</b>               |
| <b>Rapporteur</b>    | <b>:</b> | <b>Pr. HAMMANI</b>    | <b>A.</b> | <b>(DGR-IAV Hassan II)</b> |
| <b>Co-Rapporteur</b> | <b>:</b> | <b>Pr. SINAN</b>      | <b>M.</b> | <b>(EHTP)</b>              |
| <b>Membres</b>       | <b>:</b> | <b>Pr. ABDELLAOUI</b> | <b>R.</b> | <b>(DGR-IAV Hassan II)</b> |
|                      |          | <b>Pr. BOUAZIZ</b>    | <b>A.</b> | <b>(DAG-IAV Hassan II)</b> |
|                      |          | <b>Mr. FARIH</b>      | <b>A.</b> | <b>(ADI)</b>               |
|                      |          | <b>Mme. AFTI</b>      | <b>T.</b> | <b>(DRPE)</b>              |

**– JUILLET 2006 –**

# DEDIDACTE

*A mes très chers parents*

Dont les sacrifices quotidiens ont fait de moi ce que je suis.

Ils m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon parcours. Pour leur amour constant, je leur suis et leur resterai pour toujours obéissante.

Les mots ne sont pas assez forts pour exprimer.

J'espère être à la hauteur de l'image qu'ils se sont fait de moi.

Qu'ils sachent que je les associe entièrement à la réalisation de ce travail.

*A mes chères tantes, A mon oncle Abderazak*

En témoignage d'amour et de respect

*A mes cousines Bassima, Sanae, Imane, Hanane, Fatine, Nisrine,  
Soukaina.*

Que Dieu mène vos espoirs dans la vie à bonne fin

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime,*

*Je dédie ce modeste travail*

*Najlae*

# REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer, en quelques lignes, mes gratitude envers les personnes qui ont contribué à l'encadrement tant scientifique que logistique de ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes plus sincères remerciements au Professeur ALI HAMMANI pour sa disponibilité, ses précieuses directives et les conseils qu'il m'a prodigué pour mener à bien ce travail.

Je voudrais adresser mes remerciements sincères à Professeur MOHAMED SINAN, EHTP, qui a accepté de suivre de près mon travail en assurant le double rôle de supervision du projet et de l'encadrement.

Je tiens à remercier particulièrement Professeur ABDELHAFID DEBBARH qui m'a fait l'honneur de présider le Jury de ce travail. Mes remerciements s'adressent également aux Professeurs ABDELLAOUI et BOUAZIZ qui m'ont bien voulu juger ce travail et l'enrichir de leurs remarques et critiques.

Que Monsieur ABDELLATIF FARIH, chef de département à ADI, trouve l'expression de mes sincères remerciements et reconnaissances pour m'avoir donné les possibilités de réaliser ce travail de fin d'étude au sein de l'ADI et pour les moyens qu'il a mis à ma disposition. Toujours disponible, il a su me soutenir, me conseiller et m'encourager à chaque fois que cela a été nécessaire.

Ma sincère gratitude à Mme. TOURIA AFTI (DRPE) qui m'a accordé de son temps pour mettre à ma disposition toutes les données et les informations nécessaires pour réaliser ce travail.

Un grand merci à Monsieur BENJELLOUN YASSINE pour m'avoir fait bénéficier de sa compétence dans l'utilisation du SIG, et à Messieurs BERTRAND PLUS et PATRICK HURAND (CACG) pour leurs précieux conseils scientifiques et pour toutes les informations qu'ils m'ont fourni.

Ma reconnaissance et mon amitié vont à toute l'équipe d'ADI, avec laquelle le travail s'est avéré une expérience assortie d'un plaisir jamais démenti. Je pense bien sûr à RAJAE ELKSABI, HOURIYA GHAFLOULI, SAID LOUAFI, MONIQUE MY RCHID, MAHRAS HASSAN, LYAZIDI RACHIDA, dont la compétence et la gentillesse ont grandement contribué à ma productivité.

Je voudrais aussi dire «merci» à tous les enseignants du département du Génie Rural. Qu'ils trouvent l'expression de ma reconnaissance pour les efforts qu'ils ont consenti pour assurer ma formation. J'espère avoir été à la hauteur de leurs attentes.

Enfin, je remercie toute personne qui, de près ou de loin, m'a aidé à l'accomplissement de ce travail.

# RESUME

Dans la région de Guelmim, les eaux souterraines constituent la principale ressource pour l'approvisionnement en eau potable des villes de Guelmim et Tan Tan. Cependant, l'accroissement de la demande en eau potable et le développement incontrôlé des pompages à usage agricoles ont causé une surexploitation de l'aquifère de Guelmim et un déficit en eau très marquant ces dernières années. Ainsi, le développement d'outils pouvant allier entre exploitation des ressources avec durabilité des réserves constitue le principal objectif de cette étude.

En premier lieu, une étude hydrogéologique a été effectuée dans l'objectif d'actualiser toutes les connaissances nécessaires à l'évaluation des potentialités en eau souterraines de la région spécialement la nappe phréatique nommé « nappe de Guelmim ». La réalisation de cette étude a nécessité la mise en place d'un SIG en utilisant le logiciel ArcGIS®. Ce SIG, synthétisant une masse considérable de données sur les ressources en eau de Guelmim, constitue un véritable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau de la région de Guelmim. Ainsi, cet outil a été utilisé tout d'abord pour l'élaboration des cartes relatives à l'étude hydrogéologique. Ensuite deux applications ont été développées :

- Une base de données "GéoBaGue" conçu sous *Microsoft Access*® et *ArcGIS.8.3*® pour stocker des types variés de données spatiales et attributaire relatives aux ressources en eau ;
- Un menu personnalisé élaboré à l'aide du logiciel *Visual Basic*® et intégré dans un projet *ArcMap*® d'*ArcGIS*® pour accéder à toutes les cartes élaborées dans le cadre de cette étude.

Une nouvelle méthodologie a été employée pour estimer la recharge de la nappe à travers le modèle du bilan hydrogéologique validé par des données historiques et par les observations de la fluctuation du niveau de la nappe dans les puits.

Par conséquent pour évaluer différents scénarios de gestion des ressources en eaux souterraines et superficielles, une simple approche basée sur le calcul du bilan hydrogéologique et d'un ensemble d'indicateurs socio-économiques a été utilisée pour la conception du modèle d'optimisation de la gestion des ressources en eau « OGERE ». Ce modèle a été appliqué pour simuler l'effet de plusieurs scénarios d'aménagements sur la recharge de l'aquifère et proposer des mesures sérieuses pour le secteur agricole en changeant ses pratiques et en réduisant les surfaces irriguées à partir des eaux souterraines. Ainsi, un nouveau schéma d'aménagement des ressources en eau du bassin de Guelmim a été proposé pour rétablir l'équilibre des ressources en eau souterraines et assurer un développement durable de la région.

Mots clés : Bassin de Guelmim, eaux souterraines, étude hydrogéologique, SIG, Bilan hydrogéologique, modèle, gestion des ressources en eau.



# ABSTRACT

The groundwater is the main water resource for drinking water supplying of Guelmim and Tan Tan cities. However, the increase of the drinking water demand and the uncontrolled pumping proliferation for agriculture use has caused a water scarcity due to aquifer over-exploitation. In fact, the development of a management tool for sustainable groundwater exploitation is the main objective of the current study.

First of all, a hydrogeological study was accomplished in the aim to update all useful knowledge to quantify groundwater resources potential specifically for the unconfined aquifer known as “Guelmim aquifer”. The achievement of this study required GIS development, using *ArcGIS*® software. This GIS, which synthesizes a considerable amount of data on the Guelmim aquifer, constitutes a decision support tool for the water resources managers in the Guelmim region. This tool was used first to work and elaborate maps for hydrogeological study and in the second stage two applications were developed:

- A database “GeoBaGue” build with *Microsoft Access*® and *ArcGIS 8.3*® to store various types of spatial data on the water resources.
- A custom menu was designed with *Visual Basic*® software and integrated into an *ArcMap*® project to accede to all maps elaborated in framework of the current study.

A new methodology was used to estimate groundwater recharge using a hydrogeological water balance which was calibrated on the watertable evolution in some observation wells. The developed conceptual model was used to evaluate the aquifer depletion problem and to verify whether a combination of optimal irrigation management and optimal planning water resources could mitigate water scarcity problems at the scale of Guelmim basin.

In order to evaluate different surface water and groundwater management scenarios, a simple approach based on water balance calculation and on some socio-economic indicators was used to design an optimisation model, OGERE, for water resources management. In one hand, the model was applied to simulate the impact of some water resources management scenario on groundwater recharge of Guelmim aquifer. In other hand, the model was used to propose an alternative measures for agriculture practices change and for irrigation lands reduce. So, a new planning water resource scheme was suggested to insure a sustainable watertable level and a sustainable development of the Guelmim region.

Keys words: Guelmim basin, groundwater, hydrogeological study, GIS, hydrogeological balance, model, water resources management.

## ملخص

في منطقة كلميم , تشكل المياه الجوفية المورد الأساسي لتزويد مدينتي كلميم و طنطان بمياه الشرب. لكن تزايد الطلب على الماء الصالح للشرب والإزدياد الغير المراقب لمحطات الضخ لغرض فلاحي أدى الى إستغلال كبير للفرشة المائية و عجز مائي محسوس في السنوات الاخيرة. لذلك فإن تطوير آليات تمكن من التوفيق بين إستغلال الموارد وديمومة التخزين تشكل أهم هدف متوخاة من هذه الدراسة.

بداية تم القيام بدراسة هيدرولوجية بهدف جمع المعلومات اللازمة لتحديد (مخزون) المنطقة من المياه الجوفية خاصة الفرشة المائية ذات المساحة الحرة المعروفة باسم "خزان كلميم" .

تطلب إنجاز هذه الدراسة وضع نظام معلوماتي جغرافي بإستعمال برنامج "ArcGIS". هذا النظام الذي يسهل إيدار أهم كمية من المعلومات حول الموارد المائية لمنطقة كلميم , يشكل أداة فعالة لمساعدة مسيري هذه الموارد على إتخاذ القرار . لهذا أستعملت هذه الأداة أولاً لإنجاز الخرائط اللازمة للدراسة الهيدرولوجية ، و ثانياً لتطوير وسيلتين معلوماتيتين:

- قاعدة "جيوباك" طورت بإستعمال نظامي المعلومات " Access " و " ArcGIS " لتخزين كمية متنوعة من المعلومات الكيفية والميدانية المتعلقة بالموارد المائية.
- برنامج وسيت إستعمالي تم إنجازه بواسطة برنامج " Visuel Basic " ثم دمج في مشروع " ArcMap " الخاص بنظام المعلومات " ArcGIS " لتمكين الحصول على جميع الخرائط المنجزة في إطار هذه الدراسة.

ثالثاً طبقت منهجية جديدة لتقييم قابلية الفرشة على التخزين بإستعمال حساب هيدرولوجي موازن تم تثبيته بمعلومات تاريخية و أخرى ناتجة على مراقبة منسوب المياه في الآبار نتيجة لذلك.

و من أجل تقييم عدة سيناريوهات لتسيير المياه السطحية والجوفية ، أستعملت مقاربة بسيطة تعتمد على الحساب الهيدرولوجي الموازن ومجموعة من المؤشرات السوسيوإقتصادية من أجل إنجاز نموذج تحسين تسيير الموارد المائية " OGERE " . تم تطبيق هذا النموذج لمحاكاة أثر عدة سيناريوهات لتهيئة المنطقة على قابلية الفرشة المائية للتخزين و إقتراح آليات جادة خاصة بالميدان الفلاحي تتمثل في تغيير الممارسات المتبعة و نقص المساحات المروية عن طريق المياه الجوفية . هكذا تم إقتراح مخطط لتهيئة الموارد المائية لحوض كلميم بهدف إعادة التوازن للفرشات المائية و ضمان تنمية مستدامة للمنطقة.

# SOMMAIRE

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> | <b>1</b> |
|------------------------------|----------|

|   |          |
|---|----------|
| <b>CHAPITRE 1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DU BASSIN DE GUELMIM</b> | <b>4</b> |
|---|----------|

|                               |          |
|-------------------------------|----------|
| <b>1.1. CONTEXTE PHYSIQUE</b> | <b>5</b> |
|-------------------------------|----------|

|  |   |
|--|---|
| 1.1.1. DONNEES CLIMATIQUES             | 5 |
| 1.1.1.1 Précipitations                 | 5 |
| 1.1.1.2 Températures                   | 6 |
| 1.1.1.3 Evaporation                    | 6 |
| 1.1.1.4 Vents                          | 6 |
| 1.1.2. RESSOURCES EN EAU               | 6 |
| 1.1.2.1 Ressources en eau de surface   | 6 |
| 1.1.2.2 Ressources en eau souterraines | 9 |

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| <b>1.2. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE</b> | <b>9</b> |
|---------------------------------------|----------|

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1.2.1. LE SECTEUR PRIMAIRE   | 10 |
| 1.2.1.1 L'agriculture        | 10 |
| 1.2.1.2 L'activité minière   | 11 |
| 1.2.2. LE SECTEUR SECONDAIRE | 11 |
| 1.2.3. LE SECTEUR TERTIAIRE  | 11 |
| 1.2.3.1 Le commerce          | 11 |
| 1.2.3.2 Le tourisme          | 11 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.3. AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLAS :</b> | <b>11</b> |
|--|-----------|

|  |    |
|--|----|
| 1.3.1. OUVRAGES REALISES                   | 13 |
| 1.3.2. OUVRAGES EN PROJET                  | 13 |
| 1.3.2.1 Mobilisation des eaux de surface   | 13 |
| 1.3.2.2 Mobilisation des eaux souterraines | 15 |

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| <b>1.4. CONCLUSION</b> | <b>16</b> |
|------------------------|-----------|

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CHAPITRE 2. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET BASE DE DONNEES DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE GUELMIM : « GEOBAGUE »</b> | <b>17</b> |
|---|-----------|

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.1. METHODOLOGIE POUR L'ELABORATION DU SIG</b> | <b>18</b> |
|--|-----------|

|   |    |
|---|----|
| 2.1.1. PLANIFICATION DU PROJET SIG        | 18 |
| 2.1.1.1 Moyens utilisés                   | 18 |
| 2.1.1.2 Assemblage de la base de donnée : | 20 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.1.3 Exécution de l'analyse .....   | 22        |
| 2.1.1.4 Présentation des résultats .....   | 25        |
| <b>2.2. CONCEPTION DE L'APPLICATION « SIG GUELMIM »</b> .....                          | <b>27</b> |
| 2.2.1. MENU PRINCIPAL .....  | 27        |
| 2.2.2. SOUS-MENUS .....  | 27        |
| <b>2.3. CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEE GEO-SPATIALE DE GUELMIM « GEOBAGUE »</b> ..... | <b>29</b> |
| <b>2.4. CONCLUSION</b> .....   | <b>32</b> |

## **CHAPITRE 3. ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE GUELMIM** **33**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.1. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE (D'APRES DIRASSET, 2003)</b> .....                 | <b>33</b> |
| 3.1.1. RELIEFS MONTAGNEUX .....   | 33        |
| 3.1.2. PLAINES INTERIEURES .....  | 34        |
| <b>3.2. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL DE LA PLAINE DE GUELMIM</b> .....               | <b>34</b> |
| 3.2.1. CADRE STRUCTURAL (GEOATLAS, 1997) .....                                    | 34        |
| 3.2.2. PALEOGEOGRAPHIE (D'APRES DIJON, 1963) .....                                | 35        |
| 3.2.3. TECTONIQUE .....   | 35        |
| 3.2.4. ETUDE DU SUBSTRATUM DE LA PLAINE DE GUELMIM .....                          | 36        |
| 3.2.4.1 Lithostratigraphie (d'après Géoatlas, 1997) .....                         | 36        |
| 3.2.4.2 Apport des études géophysiques pour la reconnaissance du substratum ..... | 40        |
| 3.2.5. STRATIGRAPHIE DES TERRAINS PLIOQUATERNAIRES DE LA PLAINE DE GUELMIM .....  | 43        |
| 3.2.5.1 Synthèse des résultats de sondages de la région .....                     | 43        |
| 3.2.5.2 Lithologie des terrains de surface .....                                  | 46        |
| 3.2.5.3 Lithostratigraphie du Plioquaternaire .....                               | 46        |
| 3.2.6. CONCLUSION .....   | 51        |
| <b>3.3. HYDROGEOLOGIE</b> .....   | <b>52</b> |
| 3.3.1. GENERALITES SUR LES AQUIFERES DE LA REGION .....                           | 52        |
| 3.3.1.1 Les formations du Plioquaternaire .....                                   | 52        |
| 3.3.1.2 Les formations acadiennes .....   | 52        |
| 3.3.1.3 Les formations ordoviciennes .....  | 52        |
| 3.3.1.4 Les formations géorgiennes .....  | 52        |
| 3.3.1.5 Les formations adoudouniennes .....                                       | 52        |
| Aquifère à étudier .....  | 53        |
| 3.3.2. ETUDE DE LA NAPPE PLIOQUATERNNAIRE .....                                   | 54        |
| 3.3.2.1 Délimitation de L'aquifère étudié .....                                   | 54        |
| 3.3.3. DESCRIPTION DE L'AQUIFERE PLIOQUATERNNAIRE .....                           | 54        |
| 3.3.3.1 Epaisseur et réserves en eau de la nappe Plioquaternaire .....            | 54        |
| 3.3.3.2 Géométrie de l'aquifère .....   | 55        |
| 3.3.3.3 Lithologie de la nappe plioquaternaire .....                              | 55        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.4. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES -----   | 59        |
| 3.3.4.1 Transmissivité .....  | 59        |
| 3.3.4.2 Perméabilité .....  | 60        |
| 3.3.4.3 Coefficient d'emmagasinement .....  | 60        |
| 3.3.4.4 Critique des données et investigations complémentaires .....              | 63        |
| 3.3.5. HYDRODYNAMISME DE LA NAPPE -----   | 64        |
| 3.3.5.1 Profondeur de la nappe.....   | 64        |
| 3.3.5.2 Piézométrie de la nappe .....   | 66        |
| 3.3.5.3 Fluctuation de la surface piézométrique de nappe .....                    | 66        |
| <b>3.4. ETUDE SPECIFIQUE DE LA RECHARGE _____</b>                                 | <b>73</b> |
| 3.4.1. IDENTIFICATION DES MODALITES DE RECHARGE DE LA NAPPE PLIOQUATERNAIRE ----- | 73        |
| 3.4.1.1 Apports des études isotopiques .....                                      | 73        |
| 3.4.1.2 Apport des études de modélisation géochimique.....                        | 73        |
| 3.4.1.3 Apport de l'étude de télédétection appliquée à l'hydrogéologie.....       | 74        |
| 3.4.2. CONCLUSION-----  | 75        |
| <b>3.5. ETUDE DES SOURCES ET LEUR REGIME D'ECOULEMENT _____</b>                   | <b>75</b> |
| 3.5.1. LOCALISATION ET ORIGINE -----  | 75        |
| 3.5.1.1 Sources de l'aquifère plioquaternaires .....                              | 75        |
| 3.5.1.2 Sources des formations cambriennes .....                                  | 76        |
| 3.5.2. EVOLUTION DANS LE TEMPS-----   | 78        |
| <b>3.6. ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE _____</b>  | <b>80</b> |
| 3.6.1. PARAMETRES CHIMIQUES -----   | 80        |
| 3.6.2. DETERMINATION DES FACIES CHIMIQUES -----                                   | 80        |
| 3.6.3. QUALITE DE LA NAPPE SOUTERRAINE -----                                      | 81        |

## **CHAPITRE 4. ELABORATION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA NAPPE DE GUELMIM 83**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.1. DELIMITATION AGRO-HYDROGEOLOGIQUE DE ZONES HOMOGENES DE LA NAPPE DE<br/>GUELMIM _____</b>       | <b>83</b> |
| 4.1.1. CHOIX DES VARIABLES ET DES INDICATEURS -----   | 83        |
| 4.1.1.1 Les ressources en eau .....   | 83        |
| 4.1.1.2 L'agriculture.....  | 84        |
| 4.1.1.3 L'alimentation en eau potable.....  | 85        |
| 4.1.2. PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ANALYSE -----  | 85        |
| 4.1.2.1 Les ressources en eau .....   | 85        |
| 4.1.2.2 L'agriculture.....  | 90        |
| 4.1.2.3 L'alimentation en eau potable.....  | 94        |
| 4.1.3. CONCLUSION : DELIMITATION AGRO-HYDROGEOLOGIQUE DE ZONES HOMOGENES DE LA<br>NAPPE DE GUELMIM----- | 94        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.2. ELABORATION DU BILAN HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA NAPPE DE GUELMIM</b> | <b>98</b> |
| 4.2.1. INTRODUCTION -----  | 98        |
| 4.2.1.1 Qu'est ce qu'un modèle à bilan ? .....                                     | 98        |
| 4.2.1.2 Pourquoi le choix d'un tel modèle? .....                                   | 98        |
| 4.2.1.3 Objectifs et méthodologie .....  | 98        |
| 4.2.2. EQUATION ET SCHEMA GENERAL -----  | 99        |
| 4.2.3. EVALUATION DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN -----                             | 100       |
| 4.2.3.1 Les entrées.....   | 100       |
| 4.2.3.2 Les sorties .....  | 101       |
| 4.2.3.3 Les échanges entre les unités .....  | 109       |
| 4.2.3.4 La variation de la réserve de la nappe.....                                | 109       |
| 4.2.4. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE -----  | 110       |
| 4.2.5. INTERPRETATION DES RESULTATS -----  | 118       |
| 4.2.5.1 Comparaison avec les anciens modèles de la nappe .....                     | 119       |
| 4.2.5.2 Analyse de l'historique des différents termes du bilan .....               | 121       |
| 4.2.6. CONCLUSION-----   | 122       |

## **CHAPITRE 5. ELABORATION D'UN OUTIL DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU « MODELE OGERE »** **123**

|   |            |
|---|------------|
| <b>5.1. INTRODUCTION</b> _____  | <b>123</b> |
| <b>5.2. OBJECTIFS</b> _____   | <b>123</b> |
| <b>5.3. ARCHITECTURE DU MODELE ET ETAPES DE SA CONSTRUCTION</b> _____             | <b>124</b> |
| <b>5.4. PARAMETRES DU MODELE</b> _____  | <b>126</b> |
| 5.4.1. PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES-----   | 126        |
| 5.4.2. PARAMETRES SOCIO-ECONOMIQUES -----   | 127        |
| <b>5.5. IDENTIFICATION DES VARIANTES D'AMENAGEMENT</b> _____                      | <b>128</b> |
| 5.5.1. BARRAGE FASK-----  | 128        |
| 5.5.2. BARRAGE FASK + BARRAGES DE DERIVATION DES EAUX DE CRUE -----               | 129        |
| 5.5.3. BARRAGE ASSAKA -----   | 129        |
| <b>5.6. RESULTATS DE L'EXPLOITATION DU MODELE OGERE</b> _____                     | <b>129</b> |
| 5.6.1. ETAT DE REFERENCE (SANS AMENAGEMENT REALISE) -----                         | 129        |
| 5.6.2. SCENARIOS D'AMENAGEMENT -----  | 132        |
| 5.6.3. COMPARAISON DES DIFFERENTS SCENARIOS D'AMENAGEMENT TESTES -----            | 136        |
| <b>5.7. CONCLUSION : SCHEMA D'AMENAGEMENT PROPOSE ET MESURES D'ACCOMPAGNEMENT</b> | <b>139</b> |
| 5.7.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION RETENUE -----                                   | 139        |
| 5.7.2. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT -----   | 139        |

## **CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS** **143**

## LISTE DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1: Moyenne annuelle des jours de pluie .....   | 5   |
| Tableau 2: Valeurs moyennes et maximales des précipitations maximales journalières .....   | 5   |
| Tableau 3: Températures moyennes à Guelmim .....   | 6   |
| Tableau 4: indications non exhaustives pour la cueillette de certaines informations nécessaires à l'étude des ressources en eau du bassin de Guelmim .....                           | 21  |
| Tableau 5: Colonne stratigraphique synthétique du Plioquaternaire de la plaine de Guelmim.....   | 47  |
| Tableau 6 : Débit des sources d'origine plioquaternaire pour l'année 2004 .....  | 89  |
| Tableau 7 : Superficies irriguées par pompage et par commune obtenues par les deux enquêtes .....  | 91  |
| Tableau 8 : Comparaison entre différentes méthodes d'évaluation des prélèvements .....   | 92  |
| Tableau 9 : Zoning de l'étendue de la nappe selon des critères agro-hydrogéologiques .....   | 95  |
| Tableau 10 : Données sur les prélèvements par pompage direct de la nappe selon différents sources  | 102 |
| Tableau 11 : Pourcentages pour la répartition des volumes annuels prélevés de la nappe pour l'irrigation calculés sur la base des besoins en eau de deux assolements différents..... | 107 |
| Tableau 12: Différents termes utilisés pour l'évaluation des flux d'échange entre les unités.....  | 109 |
| Tableau 13 : Flux évaporatoire par tranche de profondeur de la nappe par rapport au sol .....  | 111 |
| Tableau 14: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité nord et nord-est UN.  | 113 |
| Tableau 15: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité Sud USErreur ! <b>Signet non défini.</b>  |     |
| Tableau 16: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité Ouest UO.....   | 117 |
| Tableau 17 : Bilan global annuel de la nappe pour la période entre 1989 et 2005.....   | 119 |
| Tableau 18 : comparaison des valeurs de la lame d'eau évaporée dans le secteur aval de la nappe obtenues par différents modèles .....  | 120 |
| Figure 39: Exemple de l'utilisation du solveur <i>Excel</i> ® dans le modèle OGERE .....   | 126 |
| Tableau 19 : Paramètres hydrogéologiques utilisés dans le modèle OGERE .....   | 127 |
| Tableau 20: Besoins en eau moyen en m <sup>3</sup> /ha pour chaque assolement.....   | 127 |
| Tableau 21: Valeur ajoutée agricole en DH / ha pour différents types d'assolement .....  | 128 |
| Tableau 22 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet ) à l'état actuel.....   | 131 |
| Tableau 23 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet ) à l'horizon 2015 .....   | 132 |
| Tableau 24 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet ) à l'horizon 2025 .....   | 132 |
| Tableau 25 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à l'état actuel.....   | 133 |
| Tableau 26 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à L'horizon 2015 .....   | 133 |

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 27 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à L'horizon 2025 .....                                | 134 |
| Tableau 28 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'état actuel ..... | 134 |
| Tableau 29 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'horizon 2015..... | 135 |
| Tableau 30 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'horizon 2025..... | 135 |
| Tableau 31: Comparaison des résultats du modèle OGERE : cas des ressources en eau superficielle   | 136 |
| Tableau 32: Comparaison des résultats du modèle OGERE : cas des ressources en eau souterraines  | 137 |
| Tableau 33: Analyse multi-critères pour le choix du scénario d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim .....               | 138 |
| Tableau 34 : Situation actuelle des assolements pratiquées .....  | 140 |

## LISTE DES FIGURES

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Figure 1: situation de la zone d'étude ( Source : Encarta).....  | 4                                  |
| Figure 2: Schéma de planification d'un projet SIG.....   | 19                                 |
| Figure 3 : Schéma de la construction d'une Géodatabase .....   | 26                                 |
| Figure 4 : Architecture de la GéoDatabase « Guelmim ».....   | 27                                 |
| Figure 5 : Présentation de la barre du menu principal.....   | 27                                 |
| Figure 6: différents sous-menus et commandes du projet SIG Guelmim.....  | 29                                 |
| Figure 7: Menu principal de la base de donnée GéoBaGue .....   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Figure 8 : Extrait du schéma conceptuel de donnée relatif au menu : Points IRE .....                                       | 31                                 |
| Figure 9: Exemple d'affichage de carte élaborée sur SIG dans un formulaire Access .....                                    | 31                                 |
| Figure 10: Exemple d'affichage graphiques d'historiques piézométriques qui constituent un outil d'aide à la décision ..... | 32                                 |
| Figure 11 : Colonne litho-stratigraphique schématique du bassin de Guelmim (d'après Géoatlas, 1997).....                   | 37                                 |
| Figure 12 : Coupes géologiques interprétatives .....   | 39                                 |
| Figure 13: Plan de situation des profils sismiques .....   | 41                                 |
| Figure 14: coupes interprétatives des profils sismiques passant à travers le Jbel Tayert.....                              | 43                                 |
| Figure 15 Répartition des forages en fonction de la profondeur .....   | 44                                 |
| Figure 16 : Répartition des lères venues d'eau par tranche de profondeur .....   | 46                                 |
| Figures 17: Coupes schématiques à travers le Plioquaternaire.....  | 49                                 |
| Figure 18 : Situation des forages et sources des formations d'age Cambrien.....  | 53                                 |
| Figure 19 : répartition des essais de pompage réalisés par zones.....  | 59                                 |
| Figure 20 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Guelmim au centre de la nappe .....                        | 70                                 |
| Figure 21 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Taliouine au Sud-Ouest de la nappe                         | 71                                 |



|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Figure 22 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Toutline dans la partie centrale au Nord de la nappe .....                                   | 71                                 |
| Figure 23 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Bouizakarn au Nord-Est de la nappe   | 72                                 |
| Figure 24 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région d'Abaynou au niveau de la limite Nord de la nappe .....   | 72                                 |
| Figure 25: identification des failles jouant un rôle actif pour l'alimentation des nappes profondes de la plaine de Guelmim.....                             | 74                                 |
| Figure 26: coupe illustrant l'origine profonde de la source d'Abaynou.....   | 78                                 |
| Figure 27: Evolution intra-annuelle des débits des sources de la région de Guelmim.....  | 78                                 |
| Figure 28 : Fluctuation des débits des Sources entre 1983 et 2005.....   | 79                                 |
| Figure 29 : Esquisse de la carte des résidus secs (données de l'enquête de Juillet 2005).....  | 81                                 |
| Figure 30: Diagrammes d'analyses d'eau de Scholler et Berkaloff.....   | 82                                 |
| Figure 31 : historique des prélèvements agricoles de la nappe dressé à partir des données et enquêtes disponibles.....                                       | 103                                |
| Figure 32 : Graphe de reconstitution de l'historique des prélèvements agricoles par ajustement à une loi exponentielle.....                                  | 104                                |
| Figure 33 : Historique des prélèvements agricoles répartis par unités homogènes de la nappe de Guelmim .....   | 105                                |
| Figure 34: exemple de feuille du calcul du calage du bilan hydrogéologique pour l'unité sud US.....  | 112                                |
| Figure 35 : Graphique illustrant le calage de la variation du niveau piézométrique calculé par rapport à celle mesurée pour l'unité Nord et Nord-Est UN..... | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Figure 36 : Graphique illustrant le calage de la variation du niveau piézométrique calculé par rapport à celle mesurée pour l'unité Sud US .....             | 116                                |
| Figure 37 : Graphique illustrant le calage de la variation du niveau piézométrique calculé par rapport à celle mesurée pour l'unité Ouest UO.....            | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Figure 38 : architecture du modèle de gestion des ressources en eau du bassin de Guelmim « OGERE ».....  | 125                                |
| Figure 39: Exemple de l'utilisation du solveur <i>Excel</i> ® dans le modèle OGERE .....   | 126                                |
| Figure 40 : Assolement en irrigation par pompage préconisé dans le schéma d'aménagement de la plaine de Guelmim.....   | 140                                |
| Figure 41 : Etat de dégradation des oasis de la région nord-est de la plaine de Guelmim (commune de Timoulay) .....  | 141                                |

|                         |
|-------------------------|
| <b>LISTE DES CARTES</b> |
|-------------------------|

|   |    |
|---|----|
| Carte 1 Vue générale du bassin de Guelmim .....                     | 7  |
| Carte 2: Aménagements hydro-agricoles de la plaine de Guelmim ..... | 12 |
| Carte 3 : Géologie de la plaine de Guelmim .....                    | 38 |
| Carte 4 : Isohypses du toit des schistes acadiens.....              | 42 |

|   |     |
|---|-----|
| Carte 5: Implantation des points d'eau de la plaine de Guelmim .....  | 45  |
| Carte 6 : Toit des calcaires supérieurs d'âge Cambrien inférieur.....   | 48  |
| Carte 7: Géologie de surface de la plaine de Guelmim .....  | 48  |
| Carte 8 : Isopaches du remplissage plioquaternaires.....  | 57  |
| Carte 9: Puissance de la nappe plioquaternaire .....  | 57  |
| Carte 10: Faciès des zones non saturées du Plioquaternaire .....  | 58  |
| Carte 11: Faciès des zones saturées du Plioquaternaire .....  | 58  |
| Carte 12: Localisation des essais de pompage de la région de Guelmim.....   | 61  |
| Carte 13: classes de transmissivité.....  | 61  |
| Carte 14: Valeurs de perméabilité.....  | 62  |
| Carte 15: Valeurs du coefficient d'emmagasinement .....   | 62  |
| Carte 16: Localisation d'essais de pompage complémentaires.....   | 63  |
| Carte 17 : Localisation des points d'eau enquêtés en juillet 2005 .....   | 65  |
| Carte 18: Profondeur de la nappe de Guelmim en Juillet 2005.....  | 67  |
| Carte 19 : Gradient piézométrique de la nappe de Guelmim en Juillet 2005.....   | 67  |
| Carte 20: Piézométrie de la nappe de Guelmim en Juillet 2005.....   | 68  |
| Carte 21 : localisation des piézomètres suivi par la DGH.....   | 69  |
| Carte 22 : localisation des points de mesure piézométriques complémentaires.....  | 69  |
| Carte 23: Situation des sources de la région de Guelmim et leur débit moyen jaugé en 2004.....                              | 77  |
| Carte 24 Répartition des points de suivi de la qualité de la nappe / DGH .....  | 80  |
| Carte 25 : Périmètres d'épandage d'eau de crue de la plaine de Guelmim .....  | 85  |
| Carte 26 : Variation de la piézométrie par point de mesure entre 1996 et 2005 .....   | 87  |
| Carte 27 : Variation de la piézométrie par différence des cartes piézométrique de 1997 et 2005 .....                        | 87  |
| Carte 28 : Localisation des centres de cibles à fort potentiel pour l'exploration des nappes profondes<br>(CRTS, 2002)..... | 90  |
| Carte 29: Prélèvements agricoles à partir de la nappe en 2005.....  | 93  |
| Carte 30: Situation des captages de l'ONEP .....  | 94  |
| Carte 31 : Zonning de la nappe suivant l'approche typologique.....  | 96  |
| Carte 32 : Aménagements proposés par le Plan Directeur de 1996 .....  | 130 |

## INTRODUCTION GENERALE

Le bassin hydrologique de Guelmim constitue un espace où se définit une problématique spécifique de l'aménagement des ressources en eau et où s'expriment de nombreux enjeux. Le grand paradoxe de cette zone est que le contexte de pénurie a déclenché un processus, non pas d'économie, mais tout au contraire de surexploitation de cette ressource. C'est le cas de la nappe phréatique de Guelmim, principal potentiel en eau mobilisable assurant l'alimentation en eau potable des villes de Guelmim et Tan Tan, qui est de plus en plus sollicitée par les pompes agricoles ce qui s'est traduit par une baisse croissante de son niveau piézométrique.

Ainsi, le développement de la région passe par la mise en oeuvre d'une gestion rationnelle des ressources en eau qui consiste à définir un plan d'actions permettant de pallier au problème de pénuries d'eau, et de proposer un nouveau schéma d'aménagement des ressources en eau susceptible d'améliorer, d'élever le niveau de la population, de réduire sa marginalisation géographique économique et sociale et de l'intégrer à l'économie nationale.

La région a aussi besoin d'une nouvelle politique agricole visant le maintien ou la reconversion de cette activité dans un contexte de déficit hydrique. Plusieurs mesures sont avancées : réduction de la pression sur les ressources en eau souterraines, encouragement des techniques d'irrigation par épandage, pratique de nouveaux assolements, mise en place d'une nouvelle agriculture de type «paysager» en fonction des ressources et des besoins, création de groupements pour le développement agricole et pour assurer le relais de l'Etat en matière de gestion des ressources, diversification de l'économie agricole et promotion de l'emploi, amélioration du cadre de vie et réduction de la pauvreté...

Dans cette optique, la Direction Générale de l'Hydraulique et l'Agence de Promotion et le Développement Economique et Social des Provinces du Sud du Royaume ont lancé une étude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim, en vue de satisfaire les besoins en eau des divers usagers, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif, dans une perspective de développement socio-économique et environnemental harmonieux et durable de la région.

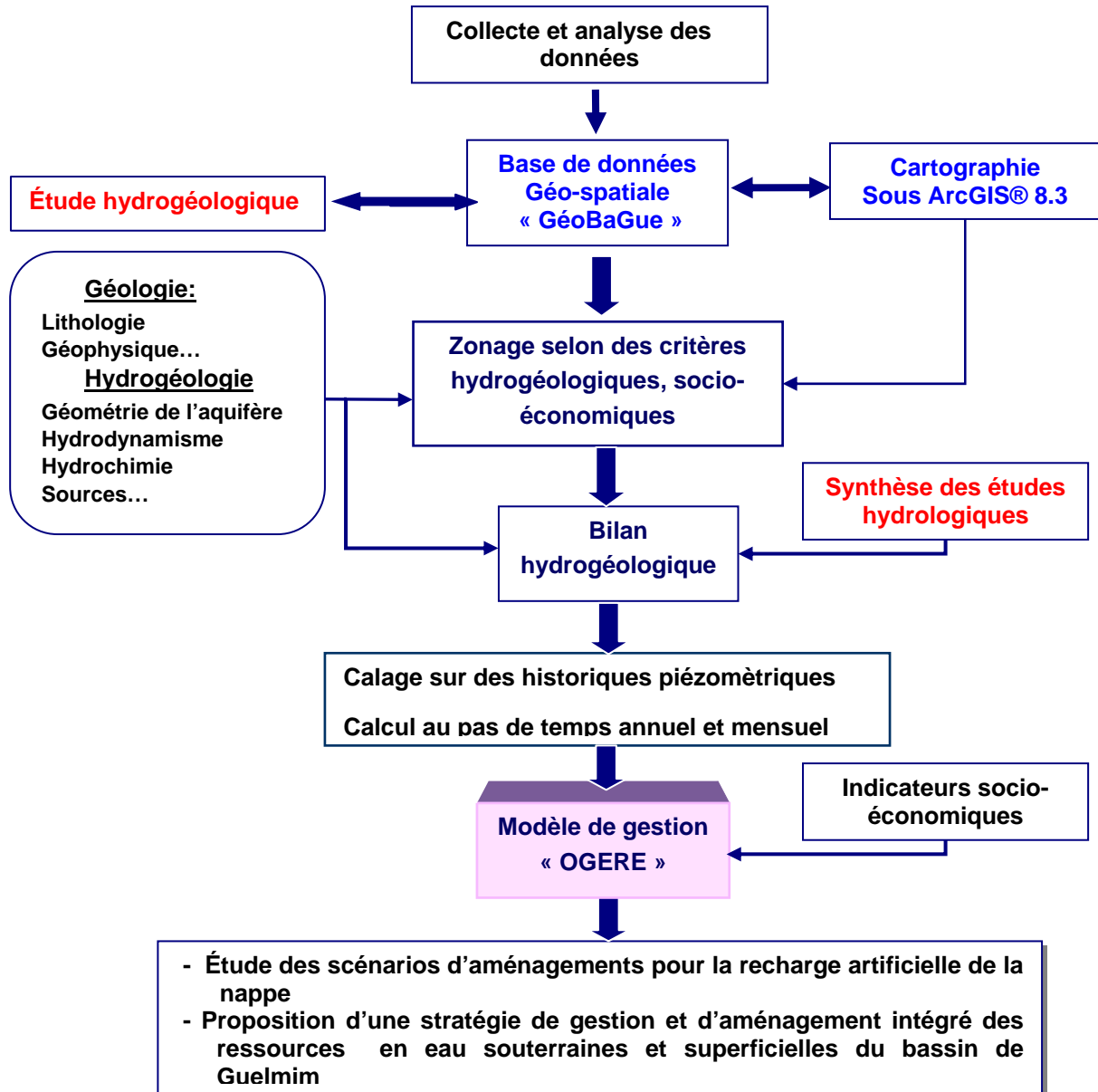
C'est dans le cadre de cette étude que s'insère le présent travail. En effet, dans le cadre de la collaboration entre l'IAV Hassan II (Département du Génie Rural) et le bureau d'étude ADI, nous avons participé à l'étude d'évaluation des ressources en eau souterraines et à celle de la demande en eau agricole. L'objet étant d'élaborer une nouvelle stratégie pour la sauvegarde et le développement des ressources en eau souterraines et superficielles.

Dans l'optique de mettre en oeuvre cette stratégie à objectifs multiples, nous avons axé le présent travail autour d'un axe central qui est la recherche des moyens les plus efficaces pour mieux gérer les ressources en eau à travers les objectifs suivants :

- Une meilleure connaissance des potentialités de la région en terme de ressources en eau souterraines ;
- Une amélioration de la gestion des données relatives aux ressources en eau par l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique ;

- Une nouvelle approche pour la gestion conjointe des ressources en eau souterraines et superficielles à travers le choix d'aménagements favorisant la recharge de la nappe et la proposition de mesures d'accompagnements pour la maîtrise du développement des pompages agricoles.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons adopté la démarche illustrée dans le schéma suivant :



Tout d'abord, un ensemble de données relatives aux ressources en eau ont été collectées, actualisées et intégrées dans une base de donnée géo-spatiale, puis utilisées pour l'élaboration de cartes sous *ArcGIS®* et dans l'étude hydrogéologique. Cette dernière, en plus d'une synthèse des études hydrologiques, ont permis de dresser le modèle conceptuel de la nappe basé sur le calcul de son bilan hydrogéologique détaillé par zone homogène. Enfin les résultats obtenus par ce modèle ont servi pour la proposition d'un outil de gestion permettant d'étudier plusieurs scénarios d'aménagement des ressources en eau du bassin de Guelmim.

Ainsi, le présent rapport est structuré de la manière suivante :

- **Chapitre 1 : Présentation du contexte hydrologique et socio-économique du bassin de Guelmim** dans le but de cadrer la ressource en eau dans son milieu géographique et socio-économique.
- **Chapitre 2 : Elaboration d'un SIG et d'une base de données « GéoBaGue »** : En vue de fournir aux gestionnaires un outil de gestion et d'aide à la décision tel que le SIG : nous allons présenter dans cette partie la méthodologie adoptée pour la conception de la base de données « GéoBaGue » qui permet d'associer entre l'affichage dynamique des cartes élaborées sur SIG et des données attributaires dans un formulaire *Access*®, et le projet SIG qui intègre un menu programmé sous *Visual Basic*® pour faciliter l'accès aux différentes cartes thématiques élaborées dans le cadre de cette étude directement à partir d'une fenêtre *ArcMap*® du logiciel *ArcGIS*® 8.3.
- **Chapitre 3 : Etude hydrogéologique** : l'objectif de ce chapitre est l'actualisation des toutes les connaissances hydrogéologiques sur la région et particulièrement celles relatives à la nappe plioquaternaire ; principale ressource en eau exploitée dans la région.
- **Chapitre 4 : Modèle hydrogéologique conceptuel de la nappe de Guelmim** : Pour la première fois, nous proposons dans le cadre de cette étude un découpage de la nappe de Guelmim en unités homogènes sur la base de critères hydrogéologiques et socio-économiques judicieusement choisis, puis un calcul détaillé du bilan hydrogéologique pour chaque unité pour une période s'étalant de 1989 à 2005. Ceci dans l'objectif de quantifier le déficit enregistré dans chaque secteur de la nappe et d'expliquer qu'elles en seraient la cause.
- **Chapitre 5 : Elaboration d'un outil de gestion des ressources en eau « modèle OGERE »** : Le but est de déterminer quelle serait la meilleure répartition des quantités en eau disponibles, comment procéder à l'optimisation de l'utilisation de la ressource en eau souterraine et comment identifier les seuils pour ne pas rompre les équilibres, un modèle d'optimisation de la gestion des ressources en eau « OGERE » a été élaboré selon une méthodologie adéquate permettant de tester la cohérence entre les quantités disponibles et les dotations entre les différents secteurs. Ce modèle, basé sur le bilan hydrogéologique et sur des choix agro-économiques simples, a permis de proposer un nouveau schéma d'aménagement des ressources en eau du bassin de Guelmim en alliant à la fois l'utilisation optimale de la ressource et le développement régional.

## CHAPITRE 1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DU BASSIN DE GUELMIM

L'ensemble du bassin versant de Guelmim correspond aux bassins versants des oueds Assaka, Bouissafen et Aoréora. Sa superficie est d'environ 10000 km<sup>2</sup>. Sur le plan administratif, la plus grande partie de l'unité de Guelmim est située dans la province de Guelmim. Seule la frange Nord du bassin Assaka déborde sur la province de Tiznit.

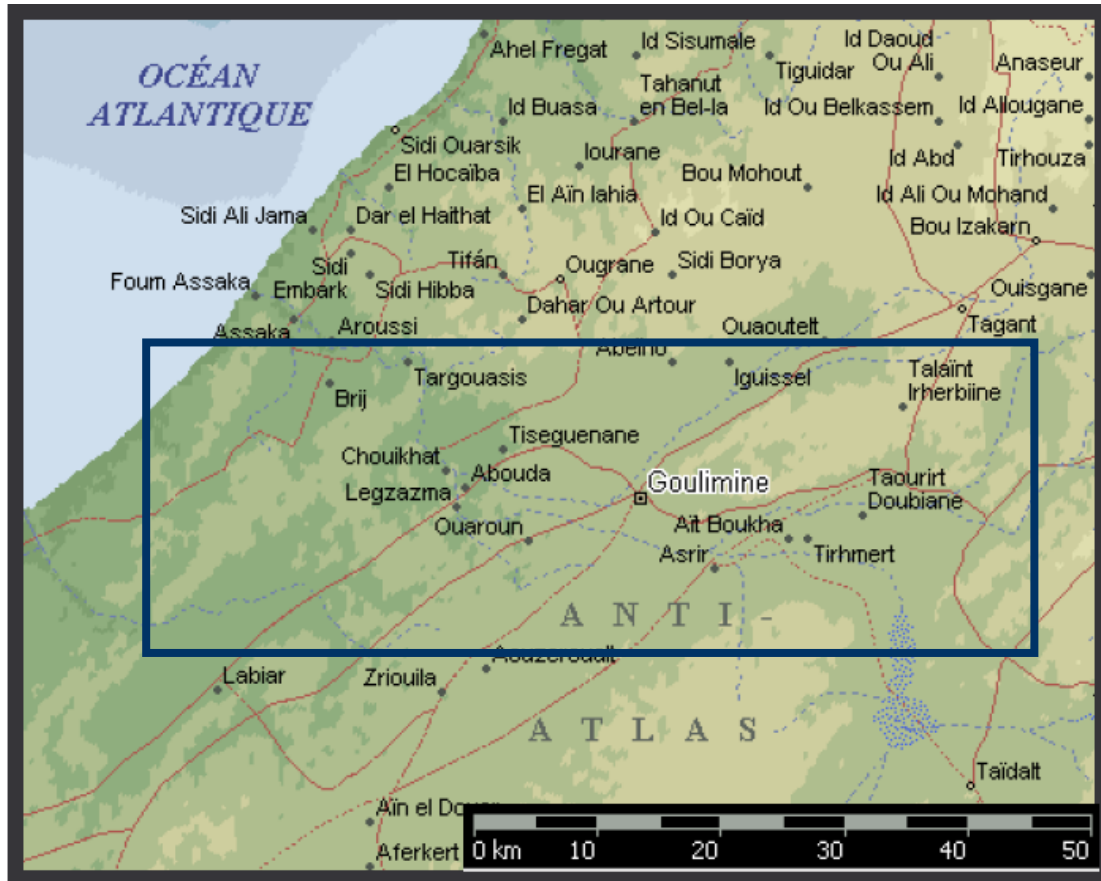


Figure 1: situation de la zone d'étude ( Source : Encarta)

La population totale de la Province de Guelmim atteint 166 685 habitants (soit 34 293 ménages) dont 114 714 vivant en milieu urbain<sup>1</sup>. La plaine de Guelmim est connue par l'importance de l'épandage des eaux de crues, grâce à plusieurs facteurs naturels favorables (lits des oueds faiblement encaissés, abondance des terres de bonne qualité, topographie plane et régulière). Durant ces dernières années, l'activité agricole a connu un développement important avec l'augmentation des superficies

<sup>1</sup> Recensement général de l'habitat 2004.

irriguées par pompage, qui dépassent 2 000 ha, ce qui entraîne une hausse de la demande en eau. Les superficies irriguées y compris celles irriguées par les eaux de crue dépassent 35 000 ha dont 12 % irriguées de façon pérenne. L'agriculture et l'élevage constituent la principale ressource économique de la région ; plus de 60% de la population vit grâce à cette activité.

## 1.1. CONTEXTE PHYSIQUE

### 1.1.1. DONNEES CLIMATIQUES

La zone d'étude est caractérisée par une aridité sévère, en raison de la présence de la chaîne du Haut Atlas faisant obstacle aux perturbations pluvieuses en provenance du Nord. Malgré la latitude, la proximité de l'océan atlantique atténue l'effet de la continentalité saharienne pour la partie proche de l'océan. Les vents sont très fréquents provoquant des accumulations sableuses de différentes formes.

#### 1.1.1.1 Précipitations

Les moyennes mensuelles montrent que la saison des pluies s'étale de Septembre jusqu'à Mars, en général, elle représente plus de  $\frac{3}{4}$  des précipitations annuelles, avec une moyenne maximale au mois de Novembre (30 mm). La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 120 mm à Guelmim, mais avec une irrégularité aléatoire très importante, entre 15 mm et 300 mm. Il peut pleuvoir entre 5 et plus de 15 jours par an, mais l'on peut rencontrer une succession de plusieurs années sèches, comme durant les campagnes 1992-93, 1993-94, 1994-95 (respectivement 24mm, 52mm et 72mm).

La saison sèche comporte fréquemment une série de 4 à 5 mois (Avril – Août), les mois de Juin et Juillet sont pratiquement secs. La moyenne annuelle des jours de pluie est faible ; elle est présentée ci-dessous :

Tableau 1: Moyenne annuelle des jours de pluie

| Poste   | Guelmim | Bouizakarne | Ifrane | Taghjicht | O. Ouerguennoun | Assaka |
|---------|---------|-------------|--------|-----------|-----------------|--------|
| Moyenne | 15      | 19          | 16     | 15        | 17              | 32     |

Les valeurs moyennes et maximales des précipitations journalières enregistrées chaque année pour les différents postes sont présentées ci-dessous :

Tableau 2: Valeurs moyennes et maximales des précipitations maximales journalières

| Poste               | Guelmim | Bouizakarne | Ifrane | Taghjicht | O. Ouerguennoun | Assaka |
|---------------------|---------|-------------|--------|-----------|-----------------|--------|
| <b>Moy. Pj (mm)</b> | 21,0    | 31,2        | 35,2   | 30,2      | 33,7            | 54,5   |
| <b>Max. Pj (mm)</b> | 50,0    | 69,0        | 76,0   | 95,0      | 41,0            | 134    |

Ces deux tableaux montrent que :

- Le régime annuel des précipitations est du type saharien, caractérisé par une concentration des pluies qui se traduit par des crues rares mais violentes et de longues périodes de sécheresse ;

- La moyenne des précipitations maximales journalières est assez forte : plus de 20 mm dans la journée pour la plupart des postes ;
- Le nombre de jours de pluies augmente avec l'altitude et la proximité de la côte.

### 1.1.1.2 Températures

La température moyenne et l'écart thermique augmentent notablement du Nord-Ouest vers le Sud-Ouest, compte tenu de la diminution de l'influence océanique. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 21°C à Guelmim. La moyenne mensuelle de maxima atteint 35 à 36°C en Juillet-Août, avec des pointes dépassant 38°C. Les minima descendent à 10° en Janvier-Février, parfois jusqu'à 7°C. La saison chaude pendant laquelle les maxima dépassent 28° dure cinq mois (Juin-Octobre).

L'amplitude thermique est en moyenne de 12°C. Sur les reliefs, les températures peuvent descendre en dessous de 0°C en hiver, et dépassent les 40°C en été. Les données des températures à Guelmim sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3: Températures moyennes à Guelmim

| Mois       | J    | F    | M    | A    | M    | J    | J    | A    | S    | O    | N    | D    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T°.moy.max | 21,3 | 22,3 | 25,4 | 26,6 | 28,1 | 30,2 | 25,0 | 36,3 | 32,1 | 32,0 | 28,0 | 22,8 |
| T°.moy.min | 10,6 | 9,9  | 11,2 | 12,5 | 13,8 | 15,6 | 17,8 | 17,8 | 15,9 | 14,7 | 12,8 | 11,1 |
| T°.moy     | 16,0 | 16,1 | 18,3 | 19,5 | 21,0 | 22,9 | 26,4 | 27,0 | 24,0 | 23,3 | 20,4 | 17,0 |

### 1.1.1.3 Evaporation

L'évaporation est très importante dans la région. Elle est de 2890 mm dans le bac classe A. L'évaporation affectant un plan d'eau a été estimée à 2120 mm/an (ADI, 2006).

### 1.1.1.4 Vents

Les vents dominants sont le Gharbi (NW/SE) et le Chergui (E/O). Les vitesses du vent et le taux d'humidité relative mesurés à la station de Tagant INRA/SM 1976/1986 varient respectivement entre 1,84 à 4,66 m/s et entre 69 à 76%. La région connaît régulièrement de violentes tempêtes de sable.

## 1.1.2. RESSOURCES EN EAU

### 1.1.2.1 Ressources en eau de surface

La région de Guelmim comprend trois bassins versants (Carte 1)

- Le bassin versant de l'oued Assaka qui s'étend sur une superficie totale de 6500 km<sup>2</sup>, constitué par un réseau d'oueds le long desquels il y a plusieurs périmètres d'épandage des eaux de crue. Le réseau hydrographique est composé par 3 sous-bassins versants des oueds principaux suivants : oued Seyyad, oued Ouerguennoun et oued Oum Al Achar ;
- Le bassin versant de l'oued Bouissafen ;
- Le bassin versant de l'oued Aoréora.



Carte 1: Vue générale du bassin de Guelmim



## **a - Bassin versant Assaka**

Composé de deux sous bassins :

### **i. Sous-bassin versant Seyyad**

L'oued Seyyad prend naissance à 1200 m d'altitude sur les versants de l'anti-atlas, constitué en majorité de roches imperméables et reçoit de nombreux affluents surtout de rive droite dont les plus importants sont : Kelmt, Tanzizt, Taouimarht, Ben Rhezzou et Oum Laachar. Le bassin Seyyad s'étend sur une superficie de 2920 km<sup>2</sup> dont 10% en plaine. Il se divise en trois sous-bassins : la partie Nord est drainé par les sous-bassins Kalmt et Ifrane, et la partie Sud est drainée par l'oued Seyyad. L'oued Seyyad et son affluent l'oued Ifrane (au niveau du barrage Id m'hand) drainent un bassin imperméable de faibles précipitations. Les eaux de crue sont dérivées par des barrages importants : Ait h'mad (2500 ha), Ait Messaoud (1500 ha), Id m'hand (1500 ha), Oum Aghanim (3100 ha) et Taghjijt (1000 ha).

### **ii. Sous-bassin versant de l'oued Ouerguennoun**

Le massif du Bani est drainé par les principaux affluents (N'mait, Taidalt, Annela, Tizgui...) qui convergent dans la Feija limitée par le Jbel Taïssa et une succession de synclinaux puis s'unissent pour former l'oued Ouerguennoun qui prend une direction plein W dans la Feija interne et circule parallèlement à l'oued Seyyad.

Aux environs de Abouda, il prend de nouveau une direction S-N et conflue avec l'oued Seyyad à l'aval de Taliouine. Son bassin versant a une superficie d'environ 2250 km<sup>2</sup> dont 15% en plaine. L'oued Ouerguennoun draine la zone où les lits des cours d'eau peu marqués, ce qui favorise l'épandage naturel des crues de maaders d'Iroualene (3900 ha) et d'Asrir (1000 ha).

### **iii. Sous bassin versant de l'oued Oum Laachar :**

C'est le troisième bassin après Ouerguennoun et Seyyad qui composent le bassin de l'oued Assaka. Il a une superficie de 930 km<sup>2</sup>. Il prend naissance dans le massif de l'Akhsass à 1150 m d'altitude. Il passe par le couloir entre le Jbel Tayert et Adrar N'tiguedit puis longe Guelmim à l'W. Ses affluents principaux sont : Talmaadert, N'tiktane, Talat N'tramt, Id Daoued et N'gouli.

A l'aval de Taliouine, l'oued Oum Al Achar traverse une plaine large de 7 km et située entre le Jbel Tayert et le massif de Sidi-Ifni. Il draine le versant S du massif des Akhsass. Les crues sont également dérivées par des barrages vers les périmètres de Oum Al Achar (2000 ha), Talmaadert (1000 ha) et Tagant (1000 ha). Cette configuration est la cause de nombreux talwegs et oueds, drainant la région, tous les ruissellements se trouvent ainsi dirigés vers la ville de Guelmim qui est donc soumise à un régime hydrologique de surface non régularisé.

## **b - Bassins versants des oueds Bouissafen et Aoréora**

Au sud de l'Oued Assaka, les bassins de l'oued Bouissafen et de l'oued Aoréora débouchent de part et d'autre de la "plage blanche" et drainent un bassin montagneux composé de schistes et de grès.

### 1.1.2.2 Ressources en eau souterraines

L'essentiel des ressources en eau souterraines est localisé dans l'aquifère plioquaternaire de la plaine de Guelmim. Elle est formée de dépôts plioquaternaires d'origines variées répartis de manière hétérogène sur les formations schisteuses de l'Acadien. Les aquifères les plus importants du point de vue des ressources en eau sont :

- Des schistes à imprégnation calcaire et les calcaires lacustres dans lesquels on peut capter des écoulements souterrains particulièrement productifs, correspondant à des chenaux karstiques.
- Un ensemble de dépôts continentaux constitué de marnes sableuses, de conglomérat, de limons déposés sur les glacis et les cônes de déjection en bordure des reliefs et des lits d'Oueds.
- Les schistes d'âge "acadien" qui constituent le sous-bassement de la plaine sont fracturés et permettent une circulation des eaux. La zone d'altération de surface de ces schistes a une puissance de 50 cm à 10 mètres, selon le degré de fracturation.

Sur les reliefs, les formations calcaires et dolomiques du "Géorgien" sont intéressantes du point de vue hydrogéologique mais difficilement accessibles en plaine. Elles occupent le nord du bassin versant des Oueds Oum Al Achar et Ifrane, et le bord du Jbel Guir au sud. En bordure de la plaine, elles disparaissent sous le recouvrement d'âge "plioquaternaire" qu'elles alimentent par abouchement à travers les schistes fracturés de l'Acadien.

Les tentatives de bilan provisoire de cet important aquifère pour la région évaluent les ressources renouvelables entre 500 et 600 l/s (Secrétariat de l'état chargé de l'eau, 2004). Ce débit semble se répartir entre les prélèvements d'eau potable et agricole (350 à 400 l/s), les pertes par évaporation dans les zones où la nappe est proche du sol (moins de 10 m) et l'écoulement par drainage au niveau de la partie aval de l'Oued Assaka.

## 1.2. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

L'aire de la présente étude correspond au Bassin hydrologique de Guelmim, d'une superficie de 10 000 km<sup>2</sup> ; il est situé au sud du Royaume, entre les bassins de Tiznit – Sidi Ifni et Sous Massa au Nord et celui de Draa au Sud et à l'Est, et s'étend essentiellement sur la province du même nom, qui fait partie de la région économique Guelmim - Essmara. Ce bassin est constitué de :

- Trois centres urbains, qui sont Guelmim (centre moyen), Bou Izakarn et Taghjijt (petits centres) ;
- 18 communes rurales.

La population totale de ce bassin s'élevait, en 2004, à 166 685 habitants (soit 0,56 % de la population totale du Royaume), répartis par milieu de résidence comme suit (Recensement général de l'habitat, 2004):

- 114 714 habitants en milieu urbain (soit 0,7 % de la population urbaine du Royaume et 69 % de la population totale de la province) ;
- 51 971 habitants en milieu rural (soit 0,39 % de la population rurale du Royaume et 31 % de la population totale de la province) ;

## 1.2.1. LE SECTEUR PRIMAIRE

### 1.2.1.1 L'agriculture

L'agriculture constitue l'activité principale dans la province de Guelmim. Elle est localisée essentiellement dans la plaine de Guelmim où on rencontre plusieurs systèmes agricoles :

- Palmeraies traditionnelles, irriguées à partir de sources (entre 1500 et 2000 ha) ;
- Périmètres d'épandage des eaux de crue (superficie variable selon l'hydraulicité de l'année, avec un maximum de l'ordre de 15000 ha);
- Exploitations individuelles, irriguées par pompage dans la nappe (système en cours de développement);
- Agriculture non irriguée (bour), très aléatoire, en fonction des conditions climatiques (sur une superficie de 500 à 7000 ha).

La surface agricole totale atteint en 1996 50 193 ha pour 7 566<sup>1</sup> exploitations, soit une taille moyenne d'exploitation agricole de 6,6 ha. L'agriculture pluviale est rare et extensive ; l'activité agricole reste concentrée dans les oasis irriguées et les zones d'épandage. Le statut juridique Melk des terres est prédominant (96 %), de même que le mode de faire valoir direct (98% des terres). Les facteurs climatiques sont particulièrement déterminants dans le développement de l'agriculture de la Province. L'activité agricole est développée en général dans les oasis, les lits des oueds, les Foums et les zones d'épandage, ainsi que dans quelques zones de pompage.

En ce qui concerne la production agricole, la céréaliculture occupe avec la jachère 98% des terres cultivables. Les céréales et en particulier l'orge, sont importantes et couvrent 1000 ha en irrigué et 35000 ha en épandage et 4000 ha en sec. Les rendements en orge irrigué peuvent atteindre 25 à 30 Qx/ha malgré l'utilisation de techniques traditionnelles. Dans les années pluvieuses, les résultats s'élevant à 18 à 27 Qx/ha ont été obtenus pour le blé tendre, et ce dans des conditions de bonnes gestion. Pour les années à faible pluviométrie, les rendements sont limités entre 5 et 12 Qt/ha. Les cultures maraîchères sont pratiquées surtout en sous-étages. Elles occupent une superficie de l'ordre de plus de 300 ha irrigués par des stations de pompage. La production est essentiellement destinée à l'auto-consommation. Le surplus est commercialisé dans les agglomérations avoisinantes.

L'élevage extensif constitue l'activité principale et primordiale de la population de la province de Guelmim. L'étendu des terrains de parcours (440000 ha) est l'un des facteurs qui a permis à l'élevage des ovins, caprins et camélidés. Malgré son caractère traditionnel et sa faible rentabilité, ce type d'élevage demeure le plus important et le plus dominant de la région avec 55 000 caprins et 3 000 camélidés.

---

<sup>1</sup> Recensement général de l'Agriculture de 1996 (RGA)

### **1.2.1.2 L'activité minière**

Les ressources minières se limitent dans la Province aux gisements d'argile de Taghijjt. Un gisement de zircon et de titane a été découvert à la plage Blanche.

### **1.2.2. LE SECTEUR SECONDAIRE**

L'activité industrielle à Guelmim reste peu développée ; comme établissement industriel important, on recense une minoterie qui emploie 130 personnes. De même, l'artisanat reste une activité locale peu développée ; la ville de Guelmim qui est une destination touristique a vu se développer un artisanat local ; on y travaille le cuivre, l'argent ainsi que le cuir.

### **1.2.3. LE SECTEUR TERTIAIRE**

#### **1.2.3.1 Le commerce**

Le commerce est une des activités ancestrales et traditionnelles de la population locale qui s'est développée historiquement en corrélation avec le mode de vie nomade. En effet, cette région a été un carrefour d'échanges commerciaux (route de l'or et du sel) entre le Nord (Marrakech, Fès, Sijilmassa, etc.) et le Sud (l'actuel Sénégal, Mali et le Niger). Depuis cette époque, le commerce reste une activité importante dans la région, surtout dans le milieu urbain.

#### **1.2.3.2 Le tourisme**

Le tourisme est l'un des principaux atouts de la province grâce aux potentialités touristiques très importantes parfois inexploitées dont il dispose tels que les plages, les dunes de sable, le soleil, la pêche, le désert, et autres dont les sites d'intérêt touristiques tels qu'embouchures de l'oued Draâ, la plage Blanche... Le taux de visiteurs reste faible et ce secteur est pénalisé par l'éloignement des aéroports, l'absence d'une communication qui valorise les atouts de la province et surtout actuellement par manque d'une infrastructure d'accueil de qualité.

En effet, la Province de Guelmim compte un seul hôtel classé. On notera que la Plage Blanche a été retenue comme site pour le développement du tourisme balnéaire et l'implantation de plusieurs milliers de lits à l'horizon 2010 (Plan Azur). Le tourisme dans la province de Guelmim est encore embryonnaire. Sa mise en valeur est indispensable pour le développement économique de cette région.

## **1.3. AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLAS :**

La plaine de Guelmim a fait l'objet de plusieurs aménagements visant la mobilisation des eaux de crue, la protection contre les inondations et l'amélioration de la recharge de la nappe. Un aperçu sur l'état actuel des aménagements réalisés au niveau du bassin de Guelmim, et un résumé sur les principales actions retenues pour l'aménagement des ressources en eau dégagées par l'étude du plan directeur d'aménagement des ressources en eau (SCET/SOGREAH, 1996) sont données ci-dessous.








La carte suivante (Carte 2) montre l'implantation des aménagements existants et projetés du bassin de Guelmim et les différents périmètres d'épandage d'eau de crue.

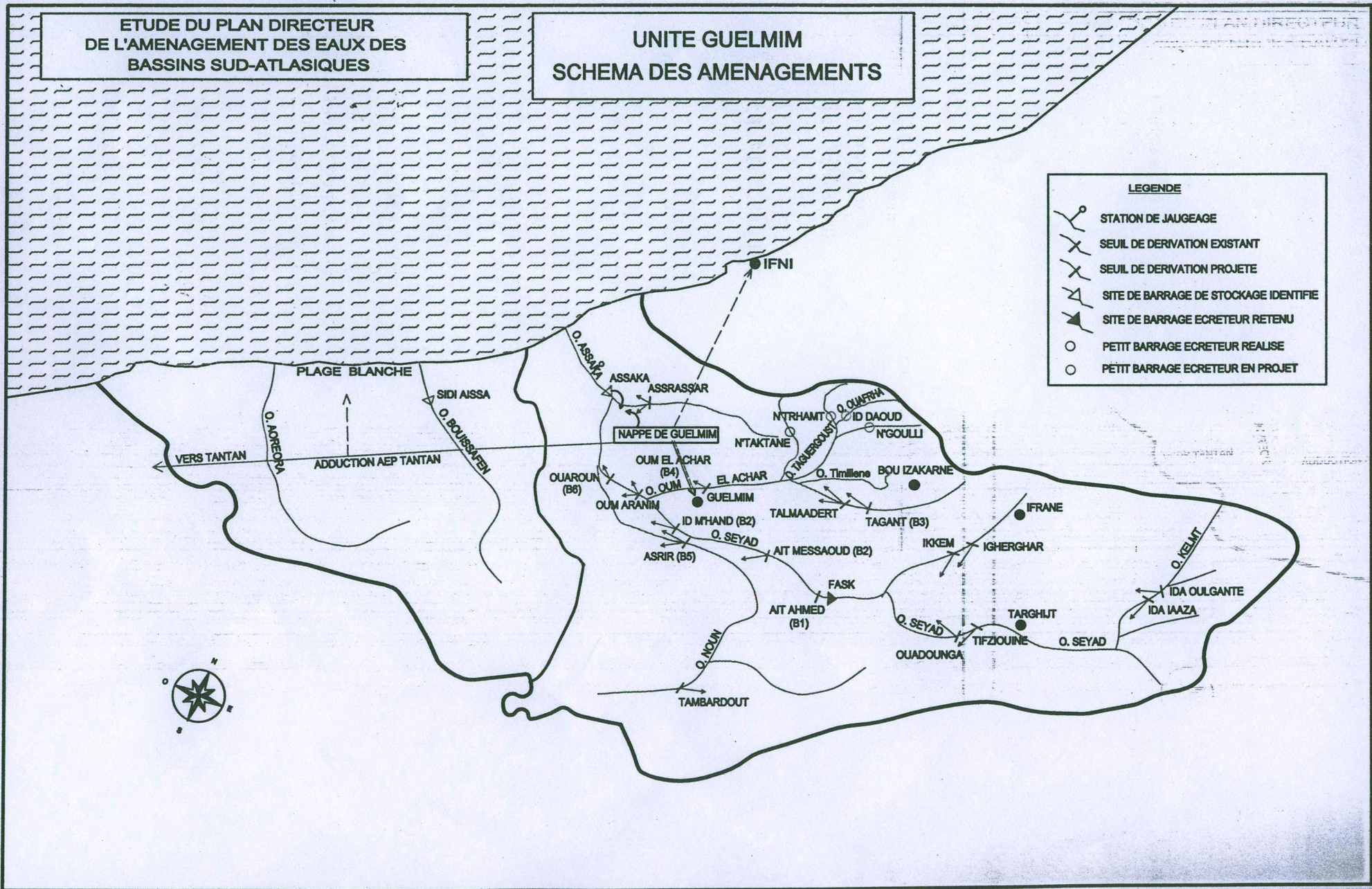


ETUDE DU PLAN DIRECTEUR  
DE L'AMENAGEMENT DES EAUX DES  
BASSINS SUD-ATLASIQUES

UNITE GUELMIM  
SCHEMA DES AMENAGEMENTS

LEGENDE

-  STATION DE JAUGEAGE
-  SEUIL DE DERIVATION EXISTANT
-  SEUIL DE DERIVATION PROJETE
-  SITE DE BARRAGE DE STOCKAGE IDENTIFIE
-  SITE DE BARRAGE ECRETEUR RETENU
-  PETIT BARRAGE ECRETEUR REALISE
-  PETIT BARRAGE ECRETEUR EN PROJET





### 1.3.1. OUVRAGES REALISES

Les principaux affluents de l'Oued Assaka (Seyyad et Oum Al Achar) ont fait l'objet d'aménagements pour l'épandage des eaux de crues. Ainsi, 10 seuils de dérivation en béton, maçonnerie ou gabions ont été construits et permettent de dériver des débits importants de 15 à 30 m<sup>3</sup>/s par ouvrage, pour une capacité de dérivation totale de 174 m<sup>3</sup>/s. Le débit dérivé est véhiculé par des canaux en tête de périmètre.

Dans l'état actuel, le volume annuel moyen dérivé dans le bassin Assaka est de 27 Mm<sup>3</sup>. Le volume effectif dérivé par les seuils de dérivation existants est de 17 Mm<sup>3</sup>/an pour une superficie dominée de 12 500 ha. Le reste, soit 10 Mm<sup>3</sup>/an, correspondant aux dérivations traditionnelles et à l'épandage naturel sur une superficie de 19 000 ha.

Dans les bassins de Bouissafen et Aoréora, les apports d'eau qui sont estimés à près de 10 Mm<sup>3</sup>/an (7 Mm<sup>3</sup>/an pour Bouissafen et 3 Mm<sup>3</sup>/an pour Aoréora) sont entièrement exploités en irrigation par épandage.

Les eaux de surface globales utilisées par épandage de crues sont estimées donc à près de 40 Mm<sup>3</sup>/an pour l'irrigation de près de 38 000 ha. Outre les eaux de crues, les eaux pérennes des sources sont estimées à 22 Mm<sup>3</sup>/an, entièrement utilisées pour l'irrigation de près de 2000 ha.

Les principaux périmètres irrigués par épandage (Carte 2) totalisent une superficie totale de 35 000 ha dont 15 300 ha équipés par des barrages de dérivation, auxquels il faut ajouter 2000 ha du périmètre Igharghar, dont le seuil sur Oued Ifrane a été aménagé récemment.

De plus, à l'amont du bassin versant de l'Oued Oum Al Achar, deux ouvrages d'écrêtement des eaux de crue ont été réalisés dans le cadre d'un Don Italien et sous la supervision de la FAO. Les objectifs principaux attendus de ces deux ouvrages sont résumés comme suit :

- Amélioration de la recharge de la nappe souterraine de la plaine de Guelmim
- La réduction du débit de pointe des crues qui causent des dégâts sur les ouvrages d'irrigation.
- Maîtrise et meilleure mobilisation des eaux par une mise en place de nouvelles techniques d'épandage à caractère organisationnel ;
- Contribution à la protection de la ville de Guelmim contre les violentes crues exceptionnelles et de courte durée de l'Oued d'Oum Al Achar ;

### 1.3.2. OUVRAGES EN PROJET

#### 1.3.2.1 Mobilisation des eaux de surface

Selon un bilan effectué dans le cadre de l'étude de contribution des ressources en eau au développement socio-économique dans les bassins du Sud (Secrétariat de l'état chargé de l'eau, 2004), l'apport total des eaux de crues dans l'unité de Guelmim est de 72 Mm<sup>3</sup>/an, ce qui laisse un volume résiduel qui se perd en mer de près de 32 Mm<sup>3</sup>/an essentiellement dans le bassin d'Assaka. La mobilisation de ce volume permettra d'améliorer le taux de couverture des besoins en eau des périmètres d'irrigation par épandage et de renforcer la recharge de la nappe de Guelmim sujette à de fortes sollicitations.

Ainsi, en plus du renforcement des barrages de dérivation existants, deux sites de grands barrages ont été identifiés dans le bassin de l'oued Assaka pour la mobilisation des eaux de crues : le barrage Fask sur l'oued Seyyad et le barrage Assaka à quelques kilomètres en amont de l'embouchure. Selon l'étude du plan directeur, le volume résidentiel à Assaka serait en moyenne de 15,7 Mm<sup>3</sup>/an après le renforcement des barrages de dérivation des eaux de crues existants et la réalisation du barrage Fask.

### **a - Renforcement des barrages de dérivation**

Plusieurs aménagements sont programmés par la Direction Provinciale d'Agriculture de Guelmim pour l'amélioration du taux de mobilisation des eaux de crues pour les périmètres d'épandage. Ces aménagements comprennent la réhabilitation des barrages de dérivation existants (Aït Hmad, d'Oum Ghanim, ...) et la création de nouveaux barrages de dérivation en remplacement des seuils traditionnels existants. Le volume supplémentaire des eaux de crues qui sera mobilisé par ces aménagements en moyenne est de 7,9 Mm<sup>3</sup>/an.

### **b - Barrage Fask**

Etant donné le système d'irrigation par épandage des eaux de crues déjà pratiqué en aval du site de ce barrage situé à 30 km à l'Est de la ville de Guelmim, le barrage Fask a été envisagé surtout pour la fonction d'écrêtement des crues en vue d'augmenter la durée de dérivation, et par conséquent des volumes dérivés au niveau des périmètres d'épandage des eaux de crue situés à son aval qui totalisent une superficie de 10400 ha. En outre, pour contribuer à l'amélioration de la recharge de la nappe, l'aménagement de seuils (6 environ) implantés le long des 10 premiers Km de l'oued a été envisagé.

Le barrage permettra également la protection des agglomérations, infrastructures et ouvrages existants à son aval contre les inondations causées par les crues violentes de l'oued Seyyad, dont le débit de pointe de la crue centennale est estimé à 2200 m<sup>3</sup>/s.

Le projet de barrage Fask permettra de créer une retenue de 30 millions de mètres cubes. Le coût du projet est estimé à 600 millions de dirhams. Malgré un ratio avantages/coûts très faible, ce barrage a été retenu par le plan car il permet d'augmenter substantiellement le volume dérivé dans les périmètres qu'il domine (11,4 Mm<sup>3</sup>/an en moyenne).

### **c - Barrage Assaka**

Le barrage Assaka, situé à 20 km au nord-ouest de la ville de Guelmim, a été proposé par le plan directeur en tant que barrage réservoir pour régulariser les eaux résiduelles de crues du bassin de l'oued Assaka avec pour objectifs :

- De garantir le débit pérenne de 100 l/s (3,1 Mm<sup>3</sup>/an), provenant des résurgences de la nappe de Guelmim, utilisé pour l'irrigation du périmètre de PMH de Targa Wassay (120 ha) situé immédiatement à l'aval du site d'Assaka ;
- De fournir un débit régularisé qui permettra de créer un périmètre d'irrigation pérenne de 1500 ha environ en amont de la retenue. L'alimentation du périmètre s'effectuera par pompage des eaux dans la retenue.



L'évaluation économique a montré que toutes les variantes du barrage ne sont pas rentables. Etant donné le coût élevé et les aléas qui pèsent sur la faisabilité du périmètre d'irrigation en amont de sa retenue, il a été proposé par l'étude du plan directeur de ne pas retenir le barrage Assaka dans le schéma d'aménagement de Guelmim en attendant une étude plus fine de la faisabilité du périmètre d'irrigation. Cependant, après la sélection du projet touristique au site de la plage blanche<sup>1</sup>, le barrage Assaka est considéré par les autorités régionales comme projet stratégique le plus prioritaire de la région car il pourra constituer la solution la plus économique pour l'alimentation en eau du projet touristique de la plage blanche. Mais compte tenu de l'aléa qui pèse sur les apports à son niveau, les ressources en eau de surface peuvent ne pas constituer une ressource en eau sûre pour ce projet.

### **1.3.2.2 Mobilisation des eaux souterraines**

Le schéma d'aménagement de 1996 préconise de réserver la nappe phréatique de Guelmim en priorité à l'alimentation en eau potable des agglomérations et d'arrêter les extensions des périmètres irrigués par pompage qui dépassent actuellement 2000 ha. Comme on le verra plus loin les études sur l'irrigation privée ont recensées plus de 1000 exploitations pratiquant les pompages qui irriguent plus de 3000 ha.

## 1.4. CONCLUSION

Les ressources en eau dans le bassin de Guelmim sont très limitées dans le temps et dans l'espace et deviennent de plus en plus rares face à la demande sans cesse croissante. Il est temps de dire que cette région tend à court terme vers une situation de crise : tous les facteurs jouent dans le sens de la dégradation:

- Le climat aride à caractère sévère où les précipitations prennent fréquemment une forme orageuse et les inondations peuvent ravager les habitations comme les cultures. Mais le fait le plus grave réside dans l'irrégularité interannuelle de ces précipitations. La période actuelle apparaît comme particulièrement défavorable.
- Le coût d'investissement est très élevé pour construire un nouveau barrage, transférer de l'eau sur de plus grandes distances, exploiter des aquifères très profonds ;
- Le système traditionnel d'appropriation et de distribution de l'eau fige des situations de rente inacceptables qui bloquent toute possibilité d'amélioration culturelle.
- La quantité d'eau disponible diminue beaucoup aussi bien à cause de l'évolution du climat que du fait de la prolifération des pompes à la périphérie des oasis.

Ce dernier facteur est le plus important et il constitue un véritable problème. En effet, La nappe phréatique exploitée dans la plaine de Guelmim constitue l'aquifère le plus important reconnu au Sud de l'Anti-Atlas. L'expansion rapide que connaissent les agglomérations de la région et le développement croissant de l'activité agricole a entraîné une surexploitation de la nappe souterraine, générant une baisse importante.

Nombreux témoignages font état de rabattements spectaculaires, estimés entre 1 à 2 m/an, portant préjudice à la pérennité de cette ressource. Si la sécheresse est en cause, le sur-pompage en est un facteur « très » aggravant. A moyenne échéance, l'alimentation en eau potable des deux grands centres de Guelmim et Tan Tan risque de se poser avec acuité.

Face à cette situation de pénurie, il est important d'agir avant tout par le rétablissement des équilibres naturels en premier lieu hydrologiques. Comme la nappe phréatique exploitée dans la plaine de Guelmim constitue la ressource en eau la plus importante et la plus exploitée, une gestion rationnelle de cette ressource nécessite une étude hydrogéologique détaillée et actualisée, ainsi qu'un modèle de gestion des ressources en eau souterraine de cet important aquifère, situé dans cette région pré-saharienne du pays.

## **CHAPITRE 2. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET BASE DE DONNEES DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE GUELMIM : « GEOBAGUE »**

L'objectif de l'élaboration d'une stratégie de gestion optimale des ressources en eau du bassin de Guelmim nécessite des études pluridisciplinaires à savoir : Hydrologie, Hydrogéologie, Pédologie, Agronomie, et Socio-économie. Toutes ces disciplines permettent de disposer d'un ensemble de données physiques et socio-économique. Toutefois, l'existence de ces données n'est pas suffisante, car faut-il encore qu'elles soient traitées et structurées afin de pouvoir en tirer toutes les informations nécessaires à l'accomplissement de la présente étude. De plus, une masse importante de données diversifiés, « en vrac », incomplètes, reste sans intérêt si elle n'est pas représentée graphiquement, cartographiée et organisée sous une base de donnée qu'on peut consulter et analyser chaque fois que le besoin se fait sentir. Ceci n'est possible qu'avec un système de traitement de données en l'occurrence un système d'information géographique, qui constitue un véritable outil d'aide à la décision.

En effet, au cours de notre contribution à l'étude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim entrepris par le groupement ADI/CACG, nous nous sommes occupés de la composante hydrogéologie dans l'élaboration du projet SIG. L'étude hydrogéologique fait l'objet de la mission II du projet et constitue la 3<sup>ème</sup> partie du présent rapport.

Dans ce contexte, et en vue d'actualiser l'information disponible, de sauvegarder et de faciliter l'accès et le traitement des données, et d'élaborer un outil d'aide à la gestion des ressources en eau, un Système d'Information « SIG + Base de donnée » a été mis en place. Les composantes de ce système sont :

- En terme de SIG : « **une géodatabase personnelle** » : c'est une nouvelle structure de stockage de données offerte par le logiciel *ArcGIS*®. Elle a l'avantage de stocker en plus des données attributaires (tables) des données spatiales tel que les fichiers de formes, les couvertures, les images rasters (uniquement avec *ArcInfo*®) telles que les fonds de carte et les images satellites dans un fichier au format Access (\*.mdb).
- En terme de base de donnée : une base de donnée globale de gestion des ressources en eau : « **GéoBaGue** » : il s'agit d'une base de donnée *Access*® contenant toutes les données relatives aux ressources en eau de la région de Guelmim.

En outre, « **GéoBaGue** » fonctionne en association avec l'application « **EsriPageLayoutControl** », un Active ControlX d'*ArcGIS*® permettant d'afficher dans un formulaire *Access*® une carte au format *ArcVIEW*® à partir de la GéoDataBase. Programmé sous *Visual Basic*®, elle offre une application cartographique complète incluant des fonctions de navigation sur les cartes (Zooms et déplacements), sans avoir à les consulter sur *ArcGIS*®.

Il convient de signaler que l'objectif recherché par cette application n'est pas d'offrir toutes les fonctionnalités d'un logiciel SIG, tels que les options de mise à jour, d'édition et de traitements complexes sur les couches, mais d'assurer les fonctions d'interrogation de données et documents cartographiques élaborés au cours de cette étude en utilisant les méthodes optimales de stockage et de

modélisation de données géographiques. Ainsi l'utilisation de « **GéoBaGue** » ne requiert pas une connaissance préalable du logiciel *ArcGIS*®, ce qui lui confère l'avantage d'être facilement exploitable. De plus, une attention particulière a été dédiée à la conception de son interface pour faciliter l'accès à l'information.

Cependant, nous avons jugé très utile d'offrir, en plus de cet outil, une troisième application pour permettre aux futurs gestionnaires l'actualisation de l'ensemble des cartes fournies par la Géodatabase sous *ArcGIS*®. Il s'agit de la conception sous *Visual Basic*® d'un menu personnalisé nommé « **SIG Guelmim** » qui, une fois intégré au Logiciel *ArcGIS*®, offre accès aux différentes couches d'informations stockées dans la Géodatabase élaborée.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur la méthodologie adoptée pour l'élaboration du projet SIG pour répondre essentiellement aux besoins de l'étude hydrogéologique, ensuite nous allons décrire les étapes suivies pour la conception et l'élaboration des applications : GéoDataBase, GéoBaGue et le menu personnalisé « SIG Guelmim ».

## **2.1. METHODOLOGIE POUR L'ELABORATION DU SIG**

### **2.1.1. PLANIFICATION DU PROJET SIG**

L'objectif de ce chapitre est de définir une architecture fonctionnelle du SIG en vue de structurer les données de façon à minimiser la duplication des jeux de données et d'avoir des données bien organisées et facilement accessibles.

Ainsi la conception de la structure du SIG a été conduite conformément aux étapes décrites dans la Figure 1 afin de répondre aux objectifs assignés à ce travail qui sont :

- L'intégration et la structuration des différentes données collectés, traitées et actualisées pour les besoins de ce travail ;
- Stockage et gestion d'une importante masse de données cartographiques élaborées au cours de cette étude ;
- Facilité de l'accès aux différentes cartes avec possibilité de superposition de différentes couches thématiques ;
- Mise à disposition des gestionnaires une base de donnée géo-spatiale bien structurée avec possibilité d'actualisation.

#### **2.1.1.1 Moyens utilisés**

##### **a - Logiciel de base**

Nous avons utilisé pour l'élaboration du projet SIG le logiciel *ArcGIS 8.3*® de Esri, doté des extensions : 3D Analyst et Spatial Analyst. Par ailleurs les cartes des courbes iso-valeurs (isopièzes, isohypses...) ont été élaborées par krigeage sur *Surfer*® puis exporté vers *ArcGIS*® sous format \*.shp.

## b - Système de projection

Les références cartographiques utilisées au Maroc se réfèrent à la projection conforme de Lambert. C'est donc ce système de projection qui a été utilisé pour l'élaboration du SIG sauf pour les couches des limites administratives qui existaient préalablement en projection géodésique. L'unité de mesure utilisée par défaut est le mètre.

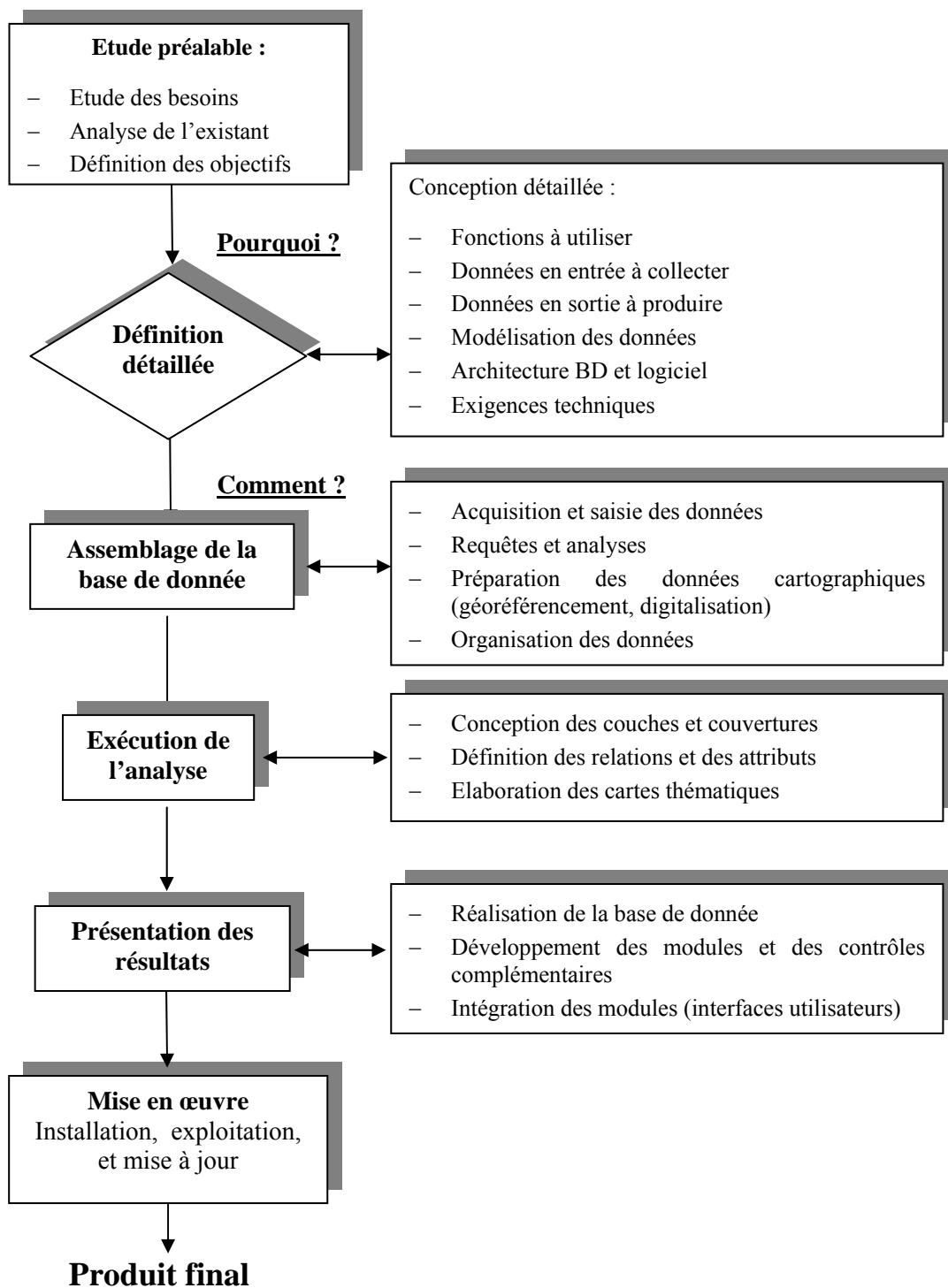


Figure 2: Schéma de planification d'un projet SIG

### **2.1.1.2 Assemblage de la base de donnée :**

La réalisation des cartes nécessaires pour l'étude des ressources en eau en occurrence les eaux souterraines ne peut s'effectuer sans l'acquisition de données diverses. En effet, la collecte de toutes les données existantes (géologiques, géophysiques, hydrogéologiques, hydrologiques, climatologiques, hydrogéochimiques, isotopiques, etc) a fait l'objet de plusieurs sorties auprès des différents organismes concernés notamment un déplacement à Agadir et à Guelmim pour discuter avec les services locaux qui sont :

- La Direction Régionale d'Equipeement DRE (Guelmim) ;
- La Direction Provinciale de l'Agriculture DPA (Guelmim) ;
- L'ONEP de Guelmim ;
- L'Agence du Bassin hydraulique de Souss Massa ABHSM (Agadir) ;
- La Division Provinciale de l'Aménagement du Territoire (Guelmim) ;
- La Direction Générale de l'Hydraulique DGH (Rabat).

#### **a - Typologie des données**

Les données collectées sont de nature diverse. Il s'agit de :

- Documents, rapports, thèses et études diverses. Ces documents dont une grande partie a été mise à disposition du bureau d'étude ADI lors du démarrage du projet ont constitué une source importante pour l'étude bibliographique de la zone de Guelmim ;
- Fonds topographiques à l'échelle 1:100.000, 1:250.000 et 1:500.000 et carte géologique à l'échelle 1:250.000 également acquis par ADI ;
- Carte du découpage administratif couvrant tout le Maroc notamment la zone de Guelmim en format numérique (fichier SHP en projection géodésique) ;
- Cartes numériques de l'occupation du sol fournis par le service des Eaux et Forêts ;
- Fiches de l'enquête des prélèvements agricoles effectuée en Juillet 2005 pour les besoins de l'étude de Guelmim ;
- Résultats du Recensement Général de l'Habitat et de l'enquête sur l'irrigation privée au Maroc disponibles sous format numérique ;
- Fiches des besoins en eau potable et schémas synoptiques fournies sous format numérique ;
- Fiches des points d'Inventaire des Ressources en Eau (IRE) et des pompages d'essai disponibles sous format papier au service des ressources en eau souterraine de la DRPE ;
- Données extraits de la Base de Donnée des Ressources en Eau BADRE21 qui stocke et gère l'ensemble des mesures entrepris par la DGH : pluviométrie, débits de jaugeage des oueds et sources, piézométrie, etc ainsi que les données sur les mesures de la qualité des eaux souterraines disponibles également sous format numérique ;
- Image satellite de la plaine de Guelmim sous format papier ;
- Données hydrologiques et climatiques, cartes thématiques diverses à différents échelles sous format papier.

Le tableau de la page suivante résume pour chaque type de donnée les sources d'informations disponibles.

**Tableau 4: indications non exhaustives pour la cueillette de certaines informations nécessaires à l'étude des ressources en eau du bassin de Guelmim**

| Type d'information   | Source d'information  | Organisme à consulter   |
|--|---|---|
| - Données climatologiques<br>- Données hydrologiques   | - Fiches, tableaux<br>- Rapports de synthèse ;  | -Direction Régionale d'Équipement DRE<br>- ABHSM  |
| -Cartes topographiques : différentes échelles<br>- Carte d'occupation du sol                         |   | Ministère d'occupation de sol et d'aménagement de territoire ; service de cartographie ; CRTS |
| - Photographies aériennes<br>- Images satellites<br>- Scènes spot ;<br>- Modèle Numérique de Terrain |   | -Centre Royal de Télédétection Spatiale CRTS<br>- SPOT image                                  |
| Documents géophysiques   | -Rapports et cartes des études géophysiques   | - DRPE<br>-Bureaux d'étude spécialisés  |
| Cartes pédologiques  |   | - Service des Eaux et forêts<br>- IAV   |
| Données hydrogéologiques   | Base de donnée BADRE21<br>Fiches des points d'eau   | DRPE  |
| Données géochimiques   | - Base de donnée sur la qualité des eaux souterraines<br>- Fiches points d'eau<br>- Réseau de suivi de la qualité des puits d'alimentation en eau potable                 | - ABHSM<br>- DRPE<br>- ONEP   |
| Informations hydrogéologiques ; géologiques et géophysiques  | Thèses ; rapports hydrogéologiques et géophysiques ; cartes thématiques, fichiers numériques divers ; études antérieures  | - DRPE<br>- Universités<br>- ABHSM<br>- Bureaux d'étude                                       |
| Données géologiques  | Rapports, thèses, cartes et articles scientifiques ; études antérieures   | - DRPE<br>- Universités et écoles   |
| Informations sur l'activité agricole   | - Enquête irrigation privée ; Enquête nationale de l'agriculture (fichiers numériques)<br>- Enquête des prélèvements (fiches d'enquêtes ; rapports et études antérieures) | - DPA<br>- DRPE<br>- Ministère d'Agriculture et de Pêche Maritime                             |
| Données démographiques   | - Recensement général de la population (fichiers numériques)<br>- Rapports et études antérieures  | - DPA ; ONEP ; DRPE<br>-Ministère de l'habitat et d'urbanisme                                 |
| Données sur l'AEP  | Rapports de synthèse, fichiers numériques   | ONEP  |
| Données sur les aménagements hydro-agricoles   | Etudes antérieures ; rapports ; fiches techniques d'ouvrages, fichiers numériques   | - DPA<br>- DRPE   |

## **b - Préparation des données pour analyse**

Au cours de cette étape, nous avons contribué avec l'équipe d'ADI à la réalisation des tâches suivantes :

- Saisie des fiches de l'enquête des prélèvements de 2005 sur la base de donnée conçue par le bureau d'étude ;
- Elaboration d'une base de donnée pour intégrer les données contenues dans les fiches des points IRE (forages, piézomètres, sources...)
- Saisie et organisation des données relatives aux ressources en eau souterraines ;
- Traitements postérieurs à la saisie: il s'agit de vérifier toutes les données afin de déceler les erreurs et d'apporter une critique en masse à l'information collectée moyennant des vérifications et croisements divers ;
- Géoréférencement des cartes topographiques à l'échelle 1:100000 ;
- Rédaction de notes de synthèse de la bibliographie disponible.

Par ailleurs, un effort important de numérisation, de géoréférencement et de digitalisation de cartes (fond géologique, réseau hydrographique et routier, limites du bassin-versant et des systèmes aquifères, cartes des études antérieures) a été réalisé par l'ADI. Ce travail a constitué un préalable pour l'élaboration des différentes couches d'informations requises pour la réalisation des différentes cartes de synthèse.

### **2.1.1.3 Exécution de l'analyse**

#### **a - Méthodologie**

Comme il s'agit de l'étape critique pour l'actualisation des données nécessaire à l'accomplissement de la présente étude, une attention particulière lui a été accordée. Ainsi, les tâches réalisées pour analyser les données disponibles sont :

- Dépouillement de l'enquête des prélèvements de 2005: notre travail a consisté à évaluer les prélèvements par pompage direct de la nappe pour usage agricole et pour l'AEP en utilisant plusieurs méthodes (débit de l'ouvrage et durée de pompage ; énergie consommée ; surface irriguée et type de culture). Nous reviendrons sur ce point plus loin dans ce rapport ;
- Elaboration sur SIG des différentes couches d'information : c'est un travail qui a été mené parallèlement à l'étude hydrogéologique. En effet, l'analyse des données hydrogéologiques a nécessité l'utilisation du SIG pour apprécier la répartition de différents paramètres et reporter sur un fond prédéfini les attributs d'une couche donnée. A l'inverse, les données issues de cette étude ont servi pour la définition des informations spatiales et attributaires pour la réalisation des couches d'informations diverses.



## **b - Description des différentes couches d'informations élaborés sur SIG par thème d'étude**

### **i. Données générales**

Ce thème regroupe un ensemble de couches issues de la digitalisation à partir des fonds topographiques ou numérisés à l'origine à savoir :

- Les limites administratives : couches de la limite de la province et des limites communes rurales, avec comme attributs les résultats du recensement de l'habitat de 1982 et 1994 ;
- La couche de la délimitation du bassin de Guelmim et des sous bassins avec l'indication de la superficie;
- La couche du réseau hydrographique ;
- Les couches des villes, du réseau routier et des localités connues dans la région.

### **ii. Climatologie et hydrologie**

Les couches relatives à l'hydrologie ont été élaborées par l'équipe d'ADI lors de l'actualisation des études des ressources en eau de surface. Nous citerons à titre indicatif:

- Les couches de situation des stations climatiques et hydrométriques ;
- Les différentes couches des isohyètes et courbes isovaleurs de la température et de l'évapotranspiration ;
- La couche des périmètres irrigués par épandage des eaux de crue avec indication de la superficie ;
- La couche des aménagements hydrauliques de la région comportant les seuils, barrages de dérivation et barrages écrêteurs de crue.

### **iii. Occupation du sol et pédologie**

Nous n'avons pas pu disposer, malheureusement, d'une carte pédologique de la zone d'étude mise à part une carte des classes pédologiques au format A4 présentant des difficultés pour son géoréférencement. Quant à l'occupation du sol, nous avons pu disposer des couches d'informations relatives aux essences forestières existantes pour toute l'étendue du bassin de Guelmim.

### **iv. Hydrogéologie**

Nous avons pris en charge la grande partie du travail d'élaboration des couches d'informations issues de l'étude hydrogéologique réalisée dans le cadre de ce travail. Dans ce qui suit seront répertoriées les différentes couches produites :

- La couche issue de la digitalisation de la carte géologique 1:250000 : une attention particulière a été accordée à la définition de sa symbologie pour qu'elle soit conforme à la légende de la carte d'origine ;
- La couche de la limite de la nappe phréatique d'âge plioquaternaire qui a fait l'objet de l'étude hydrogéologique détaillée ;
- Les couches issues de la digitalisation d'une grande masse de documents cartographiques issues d'études antérieures à savoir :

- Les couches des courbes isovaleurs du toit des schistes acadiens constituant le substratum de la nappe de Guelmim et de la profondeur des calcaires géorgiens renfermant la nappe profonde;
- Les couches des coupes géo-électriques et sismiques réalisés au cours des études géophysiques
- Les couches des isopièzes de la nappe de Guelmim à des dates antérieures ;
- La couche du toit du substratum schisteux actualisé au cours de la présente étude ;
- Les couches de localisation des coupes géologiques interprétatives réalisées pour les besoins de l'étude hydrogéologique
- Les couches de localisation des points d'eau IRE à savoir :
  - La couche des forages et puits IRE de la plaine de Guelmim avec indication de la profondeur totale et la lithologie de la couche profonde. A partir de cette couche nous avons extraits une autre renseignant sur les forages ayant atteint le substratum de la nappe avec indication de la cote et la profondeur du substratum observées pour chaque ouvrage ;
  - La couche des sources de la régions avec indication de leur origine (nappe superficielle ou profonde) et leur débit moyen mesuré en 2004 ;
  - La couche de situation des piézomètres suivis par la DGH en mentionnant le rabattement annuel observé durant les 10 dernières années ;
  - La couche de situation des points de mesures de la qualité et de la chimie de la nappe superficielle.
- Les couches d'isobathes et d'isopièzes de la nappe de Guelmim en Juillet 2005 présentés sous deux formes : courbes isovaleurs et image raster. A partir de la deuxième couche nous avons tirés deux autres :
  - La couche des lignes de courant indiquant le sens d'écoulement de la nappe ;
  - La couche du gradient piézométrique sous format raster obtenu à l'aide de l'outil « calcul de pente » fournie par l'extension *3D Analyst* d'*ArcGIS*®.
- Les couches de courbes isovaleurs de l'épaisseur de la nappe plioquaternaire et des terrains plioquaternaires ;
- Les couches de faciès des zones saturées et non saturées ;
- La couche de localisation des pompages d'essais et celles de la répartition des principaux paramètres hydrodynamiques à savoir la transmissivité, la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement ;
- Les couches des isovaleurs de la conductivité et du résidu sec au format polylignes et raster ;
- Les couches relatives aux programmes de prospection proposées lors de la présente étude à savoir : les pompages d'essai, les essais d'infiltration dans la zone non saturée et la campagne piézométrique complémentaire à celle réalisée lors de l'enquête 2005.
- La couche de localisation des points d'eau inventoriés lors de l'enquête prélèvement de Juillet 2005 en lui associant des informations relatives à l'exploitant et l'ouvrage (usage, débit...).

## **v. Demande en eau**

Nous avons regroupé dans ce thème les couches de localisation des captages de l'ONEP, de localisation des points de prélèvements agricoles, une couche illustrant la typologie des exploitations agricoles (mode d'irrigation, assolement pratiqué). En outre, nous avons additionné à la couche des communes des tables indiquant les besoins agricoles et pour l'AEP évalués au cours de cette étude.

### **2.1.1.4 Présentation des résultats**

#### **a - Elaboration des cartes thématiques**

Plusieurs cartes thématiques ont été élaborées pour représenter les différentes données issues de l'étude hydrogéologiques. On peut ainsi citer :

- Les cartes hydrogéologiques générales : Il s'agit donc des cartes élaborées dans les phases préliminaires de l'étude à savoir la carte de délimitation de l'aquifère plioquaternaire, celles de localisation des points d'eau, des points de mesures piézométriques et chimiques ;
- Les cartes paramétriques contenant un ensemble spécifique de données ayant trait à un ou plusieurs aspects touchant la présence, l'étendue et l'importance de la ressource en eau souterraine ainsi que ses caractéristiques géochimiques. Les paramètres présentés sont soit qualitatifs (lithologie du Plioquaternaire, des zones saturées et non saturée), soit quantitatifs (piézométrie et profondeur de la nappe, substratum de l'aquifère et son épaisseur, salinité de l'eau) ;
- Les cartes hydrogéologiques du système aquifère visant la compréhension du contexte hydrodynamique de la nappe, ses conditions aux limites ainsi que sa relation avec la zone non saturée. Ces cartes issues de la superposition de plusieurs cartes paramétriques (piézométriques, répartition des paramètres hydrodynamiques) ainsi que d'informations complémentaires telles que la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie...sont très utiles pour l'élaboration du modèle conceptuel utilisé dans la modélisation. C'est l'exemple de la carte des zones hydrogéologiques homogènes qui a été conçue spécialement pour les besoins du modèle de la nappe de Guelmim basé sur le calcul détaillé du bilan hydrogéologique.
- Les cartes spécialisées répondant à un besoin particulier telles que :
  - La carte des zones potentielles de la recharge issue de la superposition de la couche des faciès des zones non saturées avec celle de la profondeur de la nappe ;
  - Les cartes des campagnes de prospection proposée dans le cadre de cette étude (piézométrie, essais de pompage, essais d'infiltration) pour répondre aux besoins de la modélisation hydrodynamique qui sera entreprise par ADI ;
  - La carte des variations moyennes annuelles du niveau piézométrique qui, une fois superposée avec la carte de localisation des points de prélèvements et celles de la profondeur et de la qualité de la nappe, illustrent l'état actuel de l'exploitation de l'aquifère étudié et sa vulnérabilité vis-à-vis de l'exploitation et de la pollution.

Ces cartes constituent un très bon outil pour la planification et la gestion des eaux souterraines ainsi que la définition des aires de protection. Ainsi, l'ensemble des cartes hydrogéologiques réalisés au cours de cette étude a été judicieusement conçues selon une démarche permettant de surmonter toutes les difficultés et les subtilités de l'hydrogéologie, science s'appuyant sur des données complexes et diverses et qui demandent donc un travail multidisciplinaire.

## b - Construction de la GéoDataBase « Guelmim »

A la base, la Géodatabase est un mécanisme permettant de stocker des données spatiales et attributaires dans des tables d'une même base de données relationnelle. Dans une Géodatabase, des structures spécifiques permettent de stocker des classes d'entités, des collections (jeux) permettant d'organiser ces classes, des attributs, des relations entre les attributs et des relations entre les entités. Les données spatiales et attributaires sont ainsi stockées dans un seul fichier au format *Access*® (\*.mdb).

Une des raisons d'utiliser cette structure de données est due au fait qu'elle est personnalisable tant au niveau de son organisation (aucun modèle de données n'est imposé dans une Géodatabase) qu'au niveau de la quantité de données qui peut y être stockée. De plus, pour travailler avec une Géodatabase personnelle, aucune connexion n'est nécessaire. En effet, le moteur de base de données Microsoft Database Engine intégré dans *ArcGIS*® permet l'accès direct au fichier de la Géodatabase.

C'est ainsi que nous l'avons choisi comme format de stockage pour les différentes couches d'informations élaborées afin de réaliser une modélisation optimale des entités géographiques dans une base de données Access, fournir aux clients un modèle d'information SIG perfectionné et d'assurer la persistance de ce modèle dans tous les modèles de stockage appropriés (exemples : dans des tables SGBD standard, dans des systèmes de fichiers et sous forme de flux XML). La construction de la Géodatabase s'est effectuée selon le schéma de la figure suivante :

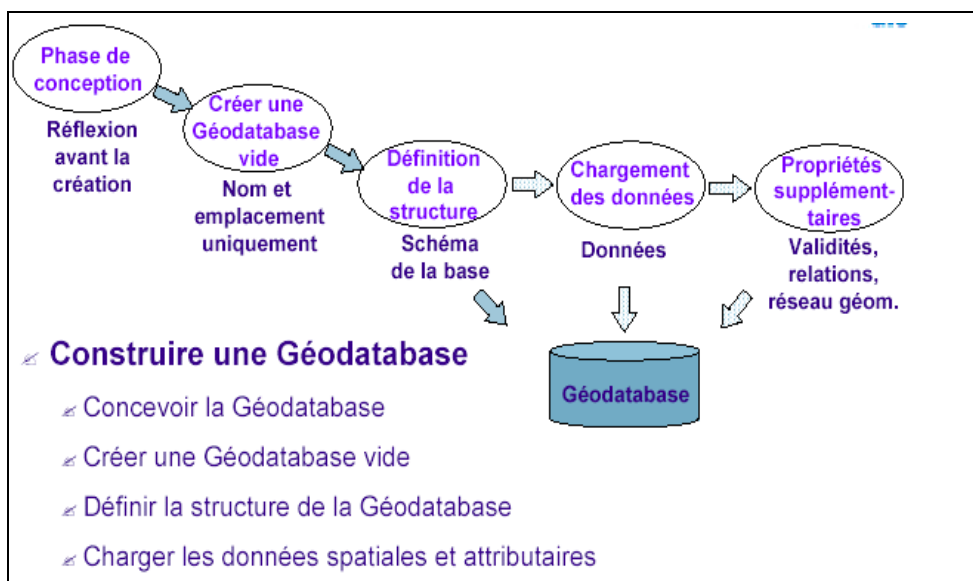


Figure 3 : Schéma de la construction d'une Géodatabase

La conception de la structure de la géodatabase s'est faite en même temps que le chargement des données à l'aide de l'outil d'importation des fichiers de forme vers la Géodatabase fournie par *ArcCatalog*®. Ainsi, nous avons choisi comme emplacement le dossier : C:\SIG Guelmim\data\Guelmim.mdb. Ensuite nous avons créé à l'intérieur de notre Géodatabase nommé « Guelmim » les jeux de classes d'entités dans lesquelles seront stockés les différents fichiers de forme (\*.shp). Comme l'option d'intégration des fichiers Rasters n'est disponible que sous *ArcInfo*®, nous avons créé un dossier nommé « raster » en plus d'un autre dossier « layers » destiné à stocker les

différentes couches des cartes élaborées. Le schéma hiérarchique suivant aide à comprendre l'architecture du SIG :

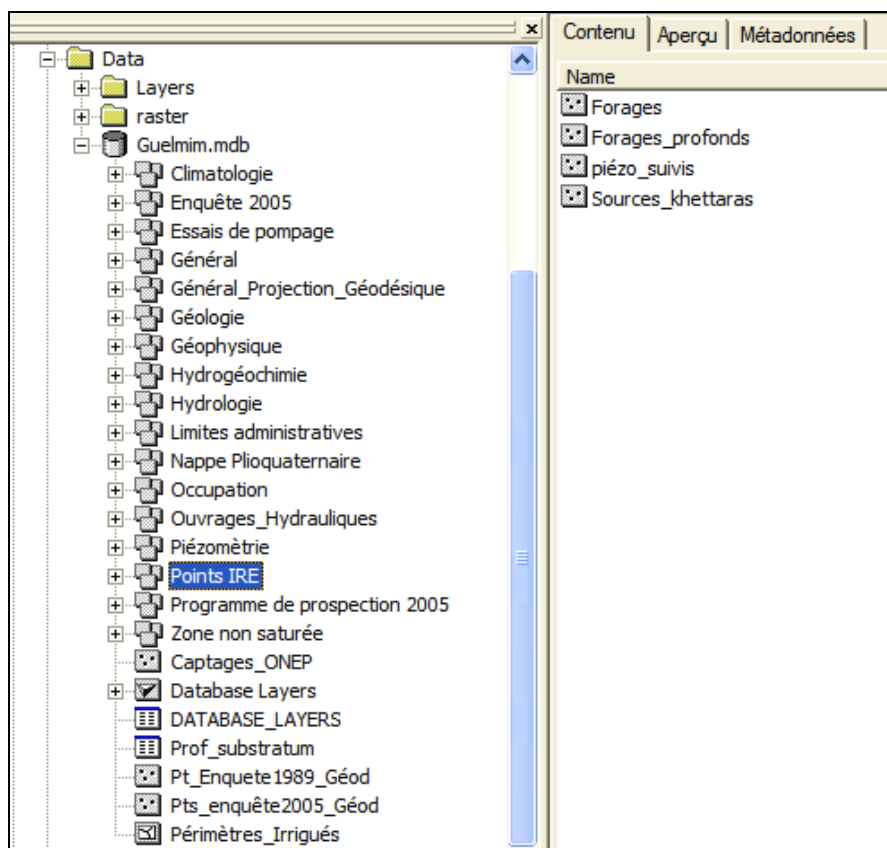


Figure 4 : Architecture de la GéoDatabase « Guelmim »

## 2.2. CONCEPTION DE L'APPLICATION « SIG GUELMIM »

Il s'agit dans ce paragraphe de présenter le projet principal : SIG Guelmim.mxd, permettant l'accès aux différentes cartes élaborées lors de cette étude directement sous *ArcGIS®* et offrant donc toutes fonctionnalités nécessaires à l'actualisation et l'exécution de traitements divers. Placé dans le répertoire C:\SIG Guelmim, il puise les fichiers sources de la GéoDatabase décrite au paragraphe précédent.

### 2.2.1. MENU PRINCIPAL

La figure suivante donne l'aspect de la barre de menu principal :

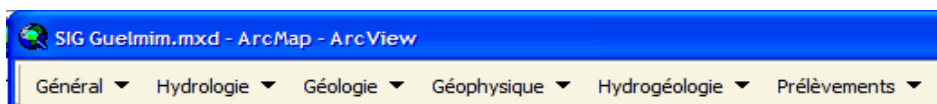
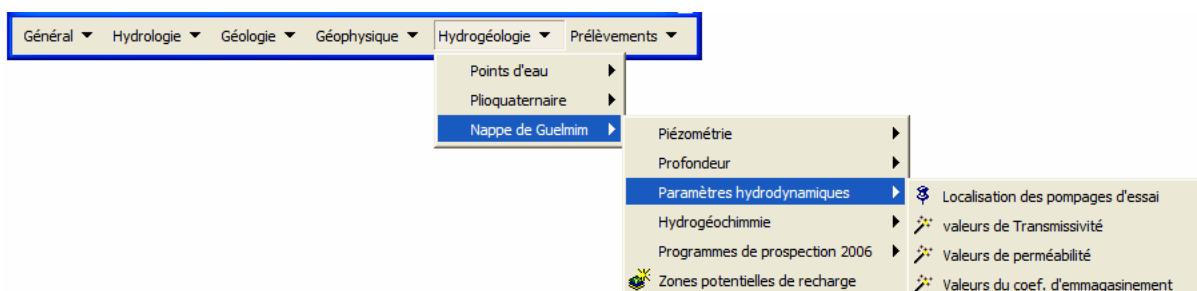
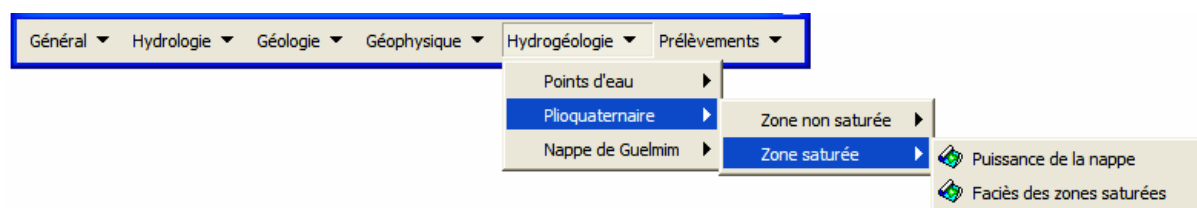
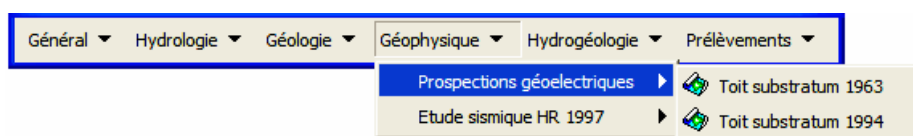
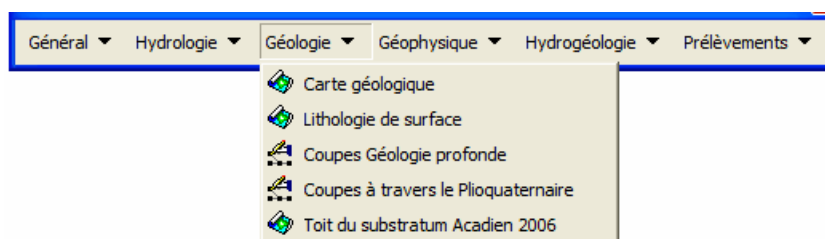
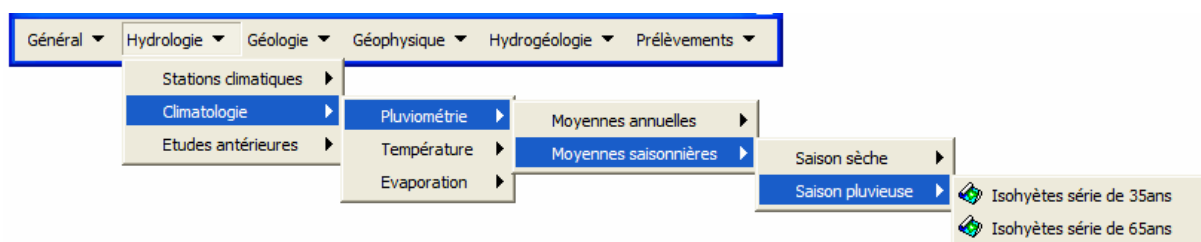
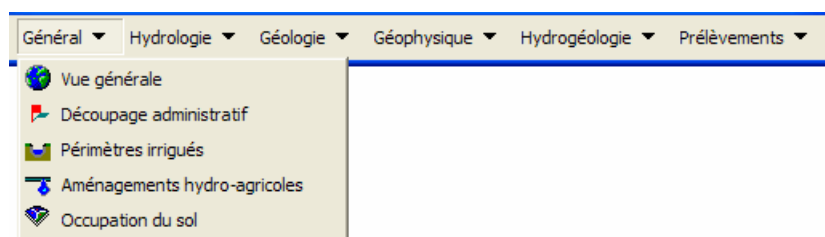


Figure 5 : Présentation de la barre du menu principal

### 2.2.2. SOUS-MENUS

Les différents sous-menus permettant d'accéder à toutes les cartes thématiques décrites dans le chapitre de l'élaboration du SIG (page 22). Programmé sous *Visual Basic®*, plusieurs commandes

nommés : UIContrôls ont été créés puis ajoutés aux différents sous-menus de la barre de menu principale comme illustré dans les figures suivantes :



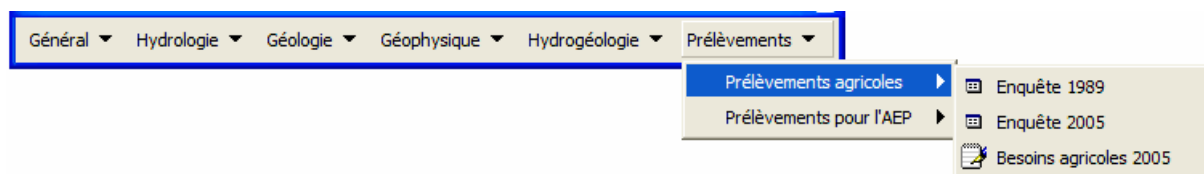


Figure 6: différents sous-menus et commandes du projet SIG Guelmim

### 2.3. CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEE GEO-SPATIALE DE GUELMIM « GEOBAGUE »

Au terme de la partie traitant les SIG, nous allons présenter un aperçu de l'application « GéoBaGue » qui comprend toutes les informations nécessaires à l'étude des ressources en eau de la région. Il s'agit d'une base de donnée conçue dans le but de recueillir toutes les données actualisés lors de cette étude avec une option supplémentaire : Affichage des cartes thématiques dans les formulaires Access grâce au contrôle ActiveX d'ArcGIS® : EsriPageLayoutControl.ocx. Cette option n'est accessible que si l'utilisateur dispose du logiciel ArcGIS® sur sa machine.



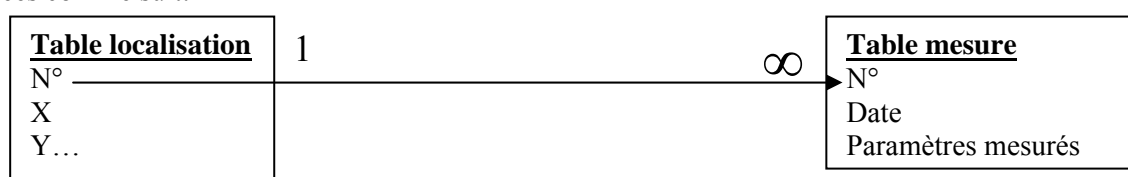
Figure 7: Menu principal de la base de donnée GéoBaGue

A l'ouverture de la base de donnée GéoBaGue s'affiche le menu principal ci-dessus qui permet d'accéder aux sous-menus suivants :

- Sous-menu « général » : qui présente des cartes générales de la zone d'étude (découpage administratif, périmètres irrigués, aménagements hydro-agricoles, périmètres irrigués) ;
- Sous-menu « ressources en eau de surface » qui regroupe
  - les données climatiques : à savoir les mesures de la pluviométrie, la température, et l'évaporation classées par station climatique ;

- Les données hydrométriques par station de jaugeage ;
- Les données sur les aménagements hydro-agricoles organisées dans des fichiers PDF ;
- Les données relatives aux périmètres d'épandage (superficie, localisation...).
- Sous-menu « Ressources en eau souterraines » qui regroupe :
  - Les données relatives au contexte géologique de la région : carte géologique et lien vers les coupes géologiques ;
  - Les différentes campagnes géophysiques (sismique, prospection électrique) présentées sous forme de cartes ;
  - Le menu « points d'Inventaire des Ressources en Eau IRE » composées des sous-menus contenant les informations sur :
    - Les forages et puits : coupes lithologiques et venue d'eau, carte de localisation.
    - Les sources et khetaras : Données de jaugeage, affichage graphique de l'évolution des débits et carte de localisation;
    - les piézomètres : Données mensuelles et affichage graphique de l'évolution du niveau piézométrique, carte de localisation ;
    - Les pompages d'essai : Données, carte de localisation et cartes de répartition des paramètres hydrodynamiques ;
    - Les points de suivi de la qualité de la nappe : Données et carte de localisation ;
    - Les campagnes d'analyses chimiques : Données et carte de localisation.
  - Le menu « nappe de Guelmim » qui regroupe :
    - Les informations sur la zone saturée et non saturée de l'aquifère étudié (faciès et épaisseur) présentées sous forme de cartes ;
    - L'état piézométrique de la nappe (carte piézométrique, de profondeur, piézométrie et du gradient hydraulique de la nappe) ;
    - Les données sur la qualité de la nappe : Cartes des résidus secs et de la conductivité hydraulique ;
    - Les résultats du calcul du bilan hydrogéologique effectué dans le cadre de cette étude (chapitre 4).
- Sous-menu « demande en eau » qui regroupe :
  - Les résultats d'enquêtes de prélèvements agricoles réalisés ;
  - Les données relatives à la demande en eau agricole par commune ;
  - Les données relatives aux captages de l'ONEP (localisation, débits...)
  - Les besoins en eau potable de la région.

En ce qui concerne le modèle conceptuel de donnée, les informations relatives aux différents points de mesures (stations climatiques, piézomètres, sources...) sont organisés dans deux tables reliées comme suit:





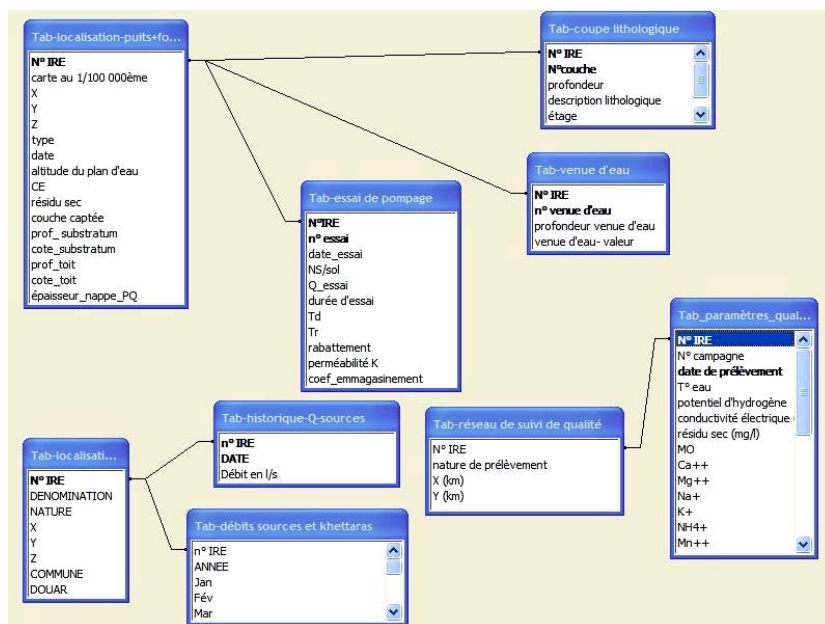


Figure 8 : Extrait du schéma conceptuel de donnée relatif au menu : Points IRE

Ci-dessous sont reportés quelques exemples d'interfaces d'utilisation de la base de donnée :

Paramètres hydrodynamiques

N° IRE:  X:  Y:

Localisation des pompages d'essai | Transmissivité | Perméabilité | Coefficient d'emmagasinement

date\_essai

NS/sol en m

Q\_essai en l/s

durée de descente en h

durée de remontée en h

rabattement en m

Td en 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s

Tr en 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s

perméabilité K en 10<sup>-4</sup> m/s

coef emmagasinement en %:

Observation:

Localisation des pompages d'essai réalisés pour la nappe de Guelmim

Outils de Zoom et de déplacement dans la carte

Figure 9: Exemple d'affichage de carte élaborée sur SIG dans un formulaire Access

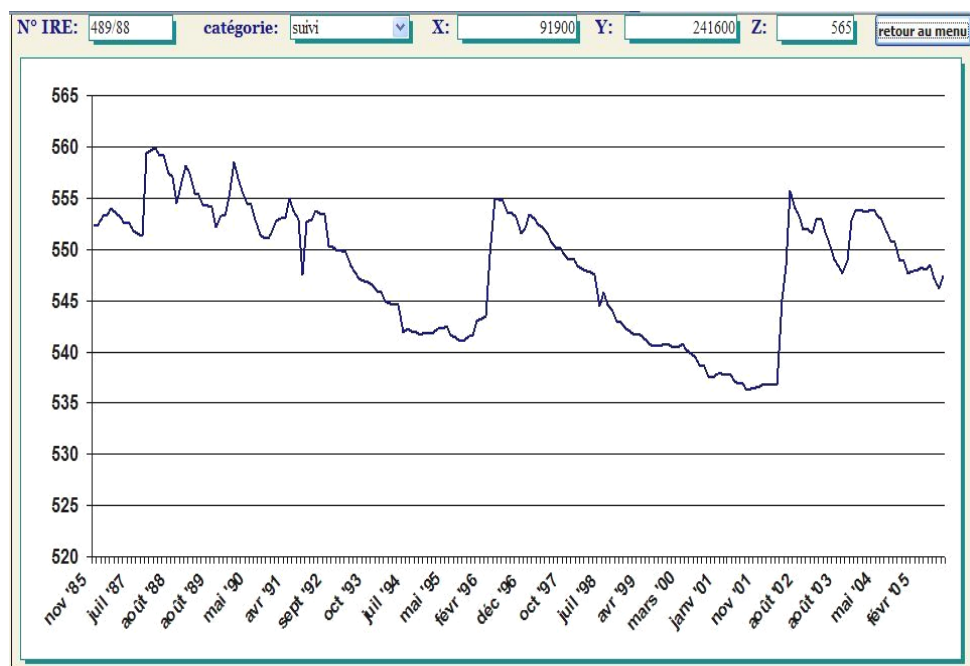


Figure 10: Exemple d'affichage graphique d'historiques piézométriques qui constituent un outil d'aide à la décision

Il est à signaler que les différentes cartes affichées dans cette base de donnée sont issues de projets *ArcMap*® pré-établis (\*.mxd) qui peuvent servir pour leurs actualisation. Ces projets puisent les différentes informations de la géodatabase décrite précédemment et donc l'affichage des cartes dans GéoBaGue n'est possible que si le dossier « SIG GUELMIM », contenant outre les données SIG d'autres types de données (figures, fichiers PDF), est copié dans le disque dur C.

## 2.4. CONCLUSION

Le projet SIG et la base de donnée élaborés dans le cadre de cette étude ont permis de présenter une masse de donnée spatiale bien organisée et de mettre en évidence l'intérêt d'intégration des SIG dans les techniques de gestion des ressources en eau et dans la prise de décision. Ainsi, l'application GéoBaGue mérite bien d'être développée, améliorée, et généralisée pour offrir d'autres possibilités pour le traitement des données.

## **CHAPITRE 3. ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE GUELMIM**

L'étude hydrogéologique de la plaine de Guelmim constitue l'objet de notre intervention dans l'étude du schéma d'aménagement des ressources en eau entrepris par le groupement ADI/CACG. En effet, nous avons réalisé, dans le cadre de stage de fin d'étude, une grande partie de la synthèse hydrogéologique demandée par l'étude précitée, en traitant tous les aspects liés à l'hydrogéologie (géologie, stratigraphie, hydrodynamisme, hydrogéochimie, ...), en plus de l'élaboration du SIG et des cartes thématiques requises pour cette étude. Ainsi, plusieurs notes de synthèses ont été rédigées pour le compte d'ADI notamment le rapport provisoire de la synthèse géologique remis au client. En outre, nous avons eu la chance de préparer et d'assister, avec l'équipe du projet, à des réunions d'avancement de l'étude à la DRPE.

Les objectifs recherchés par cette étude peuvent être résumés comme suit :

- La compréhension de la structure profonde du bassin hydrogéologique de Guelmim;
- La détermination de la lithostratigraphie du bassin notamment la stratigraphie des terrains plioquaternaires non étudiée jusqu'à présent;
- La détermination de la géométrie des différentes formations géologiques du bassin (extension, épaisseur, etc) ;
- La détermination des conditions aux limites des différentes formations aquifères ;
- La détermination des relations hydrauliques existant entre la nappe superficielle et les nappes profondes ;
- L'évaluation (selon les données disponibles) des potentialités aquifères des différentes formations hydrogéologiques du bassin.

### **3.1. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE (D'APRES DIRASSET, 2003)**

La région de Guelmim comprend deux unités principales de reliefs : les plateaux calcaires de l'anti-atlas, et les crêtes quartzitiques du Bani, qui encadrent des plaines étroites ou « Feijas », dépressions d'érosion creusées dans les schistes primaires.

#### **3.1.1. RELIEFS MONTAGNEUX**

Le trait fondamental de la structure de la région est l'existence d'une longue chaîne très ancienne, l'Anti-atlas, allongée depuis l'océan atlantique à l'Ouest jusqu'au Tafilalt à l'Est selon une direction WSW-ENE.

L'anti-atlas est un vieux massif précambrien au centre duquel l'érosion a creusé des boutonnières dans les niveaux de granites et de schistes moins résistants que les calcaires et quartzites de la couverture. Cet ensemble est parcouru par un réseau dense d'oueds, la plupart du temps à secs, qui traversent les matériaux durs (calcaires et quartzites) par des gorges imposantes, puis divaguent et étalent leur alluvions dans les dépressions schisteuses qui précèdent et suivent ces gorges. La morphologie est marquée localement par un karst typique (lapiez et dolines).

Le massif ordovicien du Bani est séparé du noyau anti-atlasique par deux larges Feijas dans les schistes. Il est formé par une succession de plis, d'anticlinaux et de synclinaux, créant un relief appalachien, accentué par la surimposition de la vallée. Les pentes raides en amont, associées à la dégradation du couvert végétal, donnent naissance à des régimes violents de crues et influencent considérablement la fréquence et la durée des apports, aussi bien liquides que solides.

### **3.1.2. PLAINES INTERIEURES**

Plus au Sud (au sein de l'anti-atlas), on trouve des dépressions allongées parallèlement aux rides appelés localement « les Feijas ». Ces Feijas constituent une série de dépressions et d'érosion, de nature monoclinale entre l'anti-atlas et le Bani, et souvent synclinale dans le Bani, creusées pour leur majorité dans les schistes formant la base de l'Acadien.

Le long des vallées encaissées dans les différentes formations morphologiques on trouve des accumulations de dépôts villafranchiens et quaternaires de nature et de lithologie variées : cônes de déjection, dépôts lacustres, limons d'épandage, encroûtements calcaires, et alluvions qui correspondent soit à des accumulations de matériaux meubles et fins, transportés par les eaux de ruissellement ou des matériaux grossiers transportés par les oueds au moment des grandes crues.

La plupart des encroûtements rencontrés dans la zone d'étude sont en général d'origine calcaire et sous formes de dalles. L'importance de ces croûtes calcaires apparaît à la surface du sol et diminue avec l'altitude. Les encroûtements restent limités aux reliefs et à quelques regs surélevés anciens. Au-dessus de ces accumulations meubles se sont développées les sols les plus épais de la région, ce qui a permis le développement d'une végétation luxuriante.

## **3.2. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL DE LA PLAINE DE GUELMIM**

L'objectif de ce chapitre est la détermination de la nature et la structure des formations géologiques susceptibles de jouer un rôle hydrogéologique notamment dans la recharge artificielle de la nappe. Pour ce faire nous avons exploité et actualisé toutes les données disponibles (géologie, géophysique, etc) en mettant l'accent sur un point très peu étudié dans les études hydrogéologique précédentes : la stratigraphie des formations plioquaternaires qui renferment la principale ressource en eau souterraine exploitée de la région nommée « nappe de Guelmim »,

### **3.2.1. CADRE STRUCTURAL (GEOATLAS, 1997)**

L'ensemble du bassin se situe dans le massif de l'anti-atlas et constitue une zone synclinale complexe, encadrée par les boutonnières de Kerdous au Nord-Est, de Sidi Ifni au Nord, et du Bas Drâa au Sud.

Les 2 grandes unités observées dans la région sont les plateaux calcaires et le Bani plissé :

- Plateaux calcaires : d'âge cambrien et infra cambrien, ils se séparent en 2 ensembles :
  - Bordure du massif d'Ifni, d'Ouest en Est ;
  - Massif du Drâa (Jbel Taïssa) au Sud-Ouest.

Ces plateaux sont cernés par des affleurements schisto-gréseuses et à leur pied par des « Feijas internes » dont le substratum est formé des schistes acadiens masquées par des formations quaternaires.

- Bani plissé : formés par 5 à 6 alignements synclinaux ordoviciens parcourus par l'oued Seyad et ses affluents, qui alternent avec des axes anticlinaux notamment ceux des oueds Ifrane et Klem. Les synclinaux sont formés de schistes gothlandiens alors que les anticlinaux sont formés de « schistes des Feijas externes » d'âge ordovicien.

### **3.2.2. PALEOGEOGRAPHIE (D'APRES DIJON, 1963)**

Les massifs d'Ifni et Dràa ont été le siège d'un volcanisme assez intense, donnant naissance à plusieurs complexes laviques essentiellement rhyolitiques et à une érosion intense.

Une première transgression marine s'est ensuite produite sur les massifs anciens d'W vers l'E, et a déposée une série épaisse d'une centaine de mètres, formée de calcaires et schistes verts. Une deuxième transgression s'est produite par le dépôt de calcaires inférieurs adoudouniens qui atteignent une puissance de 1000 m localement et jusqu'à 3000 m à Lakhsass. Une rapide régression caractérisée par des dépôts de couleur « lie de vin » calcaires à l'W et de plus en plus schisteux vers l'E.

Une quatrième transgression a déposée la série des calcaires supérieurs constituant l'Adoudounien supérieur. Celui-ci se terminera par une phase de sédimentation à laquelle font suite les bancs de calcaires sombres du géorgien proprement dit, constitués par 3 termes :

- La série schisto-calcaire ;
- La série schisteuse à coloration caractéristique ;
- La série régressive des grès terminaux.

Au delà de la transgression géorgienne s'est produite une transgression acadienne qui a déposé la série puissante des schistes verts à paradoxides de 1000 m d'épaisseur, l'acadien se termine par des dépôts de grès quartzitiques.

La transgression ordovicienne a ensuite déposé les schistes des « Feijas externes » surmontées par des « quartzites du Bani » auxquels succèdent localement des brèches et conglomérats, signes précurseurs d'une émergence. La transgression gothlandienne s'est manifestée par des affleurements réduits de schistes noirs ou gris surmontés de calcaires bleus.

### **3.2.3. TECTONIQUE**

Les couches de la région sont affectées de plis très spectaculaires. La direction des plis est NNE/SSW. Les anticlinaux sont souvent pincés alors que les synclinaux sont larges et à fond plat. La carte géologique de la région au 1/200'000 (Carte 3) indique plusieurs failles qui affectent le massif cambrien au Sud de Guelmim, ces failles sont prolongées hypothétiquement sous le quaternaire en direction du Jbel Tayert.

La région de Bou Izakarn est tectoniquement plus complexe, avec des plis étroits sub-méridiens affectant la série carbonatée cambrienne et adoudounienne. Les plis présentent une nette incurvation, leur orientation WSW/ENE à Guelmim passant à NNE/SSW près de Bou Izakarn. Les affleurements

des collines de Fask présentent une schistosité très marquée due certainement au passage d'un accident tectonique important.

### **3.2.4. ETUDE DU SUBSTRATUM DE LA PLAINE DE GUELMIM**

#### **3.2.4.1 Lithostratigraphie (d'après Géoatlas, 1997)**

Les coupes géologiques réalisés (Figure 12) et le log stratigraphique synthétique de la plaine de Guelmim (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) montrent que la série stratigraphique peut être décrite de la base au sommet comme suit :

##### **a - Le Précambrien éruptif**

Il est constitué de formations rhyolitiques, andésitiques et basaltiques témoignant d'une activité volcanique importante dans le massif d'Ifni. Ces formations sont les plus anciennes et affleurent dans les boutonnières d'Ifni et de Kerdous (coupe I) ainsi qu'au niveau de Jbel Taïssa (coupe IV). Toutes les couches de ces formations sont compactes dans leur masse, mais présentent des fissurations superficielles importantes et des zones d'altération ou d'accumulation détritiques.

##### **b - L'Infra-Cambrien**

- Série de base : Les formations cristallines du Précambrien sont transgressées par des conglomérats grossiers à éléments éruptifs surmontés eux même par la série schisteuse de base épaisse d'une centaine de mètres. Ces conglomérats de base attribués à l'Adoudounien affleurent particulièrement bien le long de la route Guelmim - Ifni et au Nord d'Abaynou (coupe III) à l'entrée du village de Tagounfil où ils dépassent 100 mètres de puissance.
- Calcaires inférieurs : La Cette série, d'âge Adoudounien inférieur, est formée essentiellement par des calcaires dolomitiques et dolomies avec quelques intercalations schisteuses à la base. La puissance de la série varie entre 3000 m aux Akhsas et 1000 m à l'Est, où les intercalations schisteuses de base disparaissent. Il s'agit de bancs métriques formant des montagnes à relief mou entourant la boutonnière d'Ifni. Ces faciès s'observent bien le long de la piste menant d'Abaynou à Tagoufil.
- Série lie de vin : Elle est de nature calcaire à l'Ouest d'Akhsas et schisto-calcaire et argileuse vers l'Est et le Sud. La puissance de la série est de 600 m à l'Ouest et diminue vers l'Est et le Sud.

##### **c - Le Géorgien**

La série calcaire infracambrienne se poursuit sans discontinuité lithologique dans le Cambrien inférieur et la limite stratigraphique est donc difficile à préciser faute d'arguments paléontologiques. La série est connue sous le nom de calcaires supérieurs, elle atteint 400 à 500 mètres d'épaisseur au Sud d'Abaynou.

Le Géorgien se termine par une série schisto-calcaire avec des intercalations de schistes verdâtres contenant de rares trilobites et de grès, ceci dans la plaine de Guelmim au Nord et surtout dans la plaine d'Asrir au Sud, au Jbel Taïssa-Guir. Des grès terminaux près d'Asrir (au Sud de Guelmim) recouvrent cette unité. Ils affleurent bien sur le rebord Sud du synclinal de Guelmim.

### d - L'Acadien

La série acadienne comprend deux termes principaux :

- A la base, les schistes verts ou schistes de Féjjas internes constituant le substratum de la plaine. Ce sont les schistes à Paradoxides qui apparaissent très localement, sur la route menant vers la plage blanche où à la faveur des petites collines jalonnant souvent les accidents tectoniques dans la plaine de Guelmim (Géoatlas, 1997).
- La puissance de cette série a été estimée par Dijon (1966) entre 500 et 1000 m. Selon l'étude de sismique réflexion (Géoatlas, 1997), cette formation atteint 2500 m d'épaisseur à Guelmim.
- Au sommet, on trouve des grès et quartzites qui affleurent au niveau du Jbel Tayert (coupes III et V). Cette unité est dénommée barre de Guelmim.

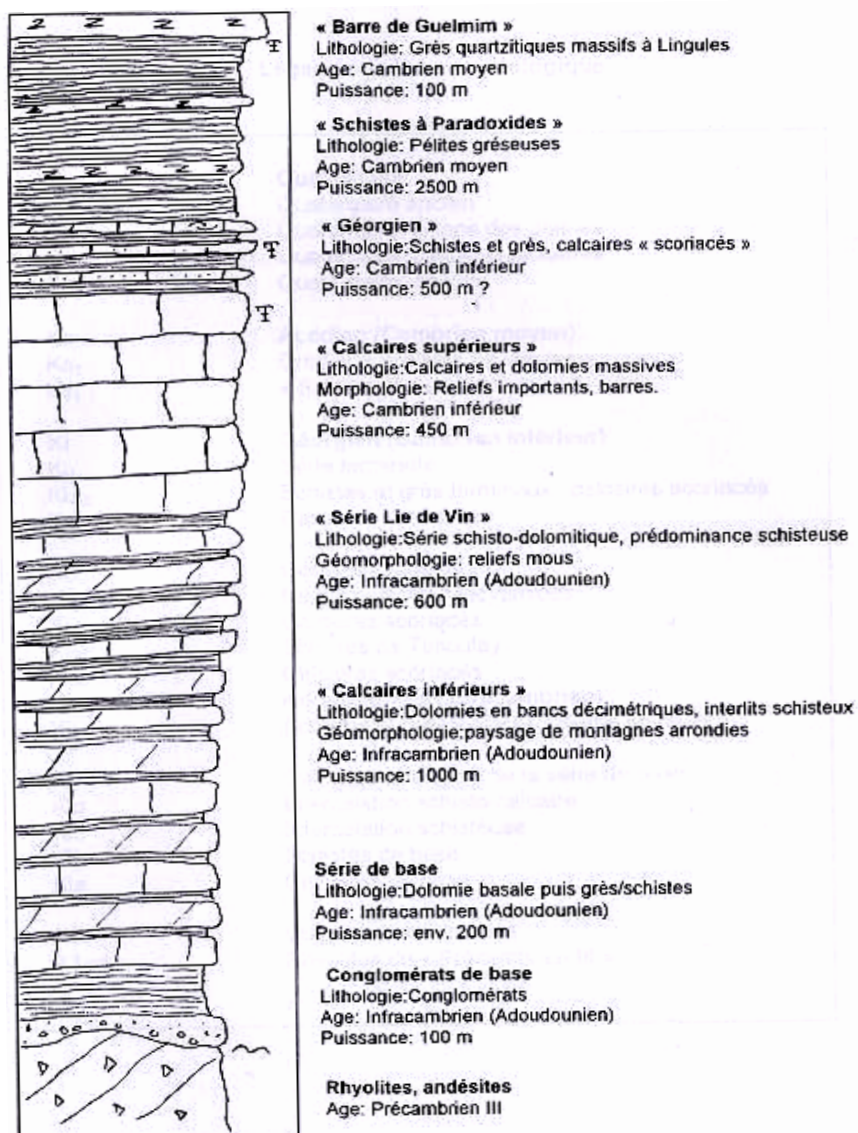


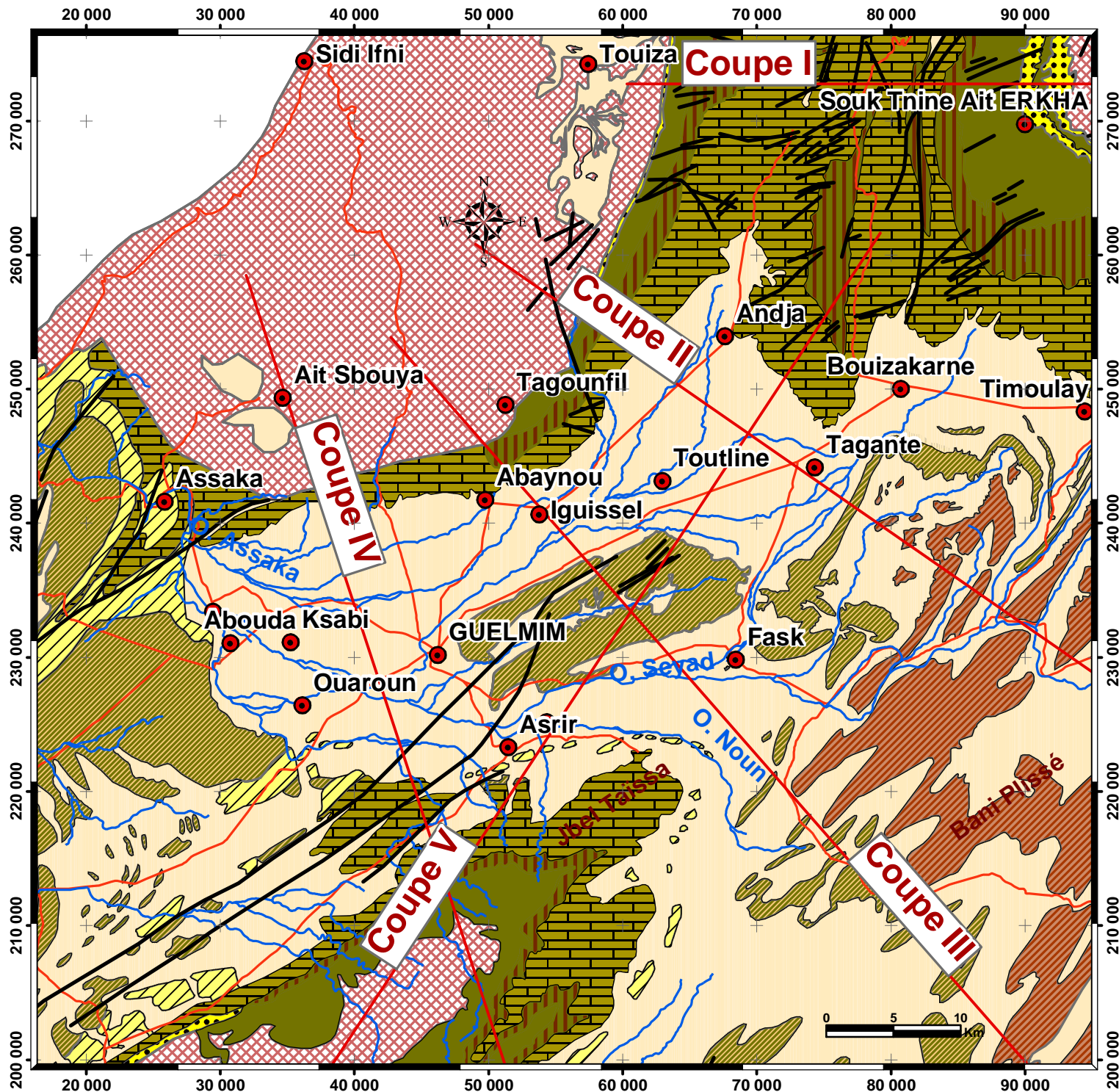
Figure 11 : Colonne litho-stratigraphique schématique du bassin de Guelmim (d'après Géoatlas, 1997)



**Carte 3: Géologie de la plaine de Guelmim**

**Légende**

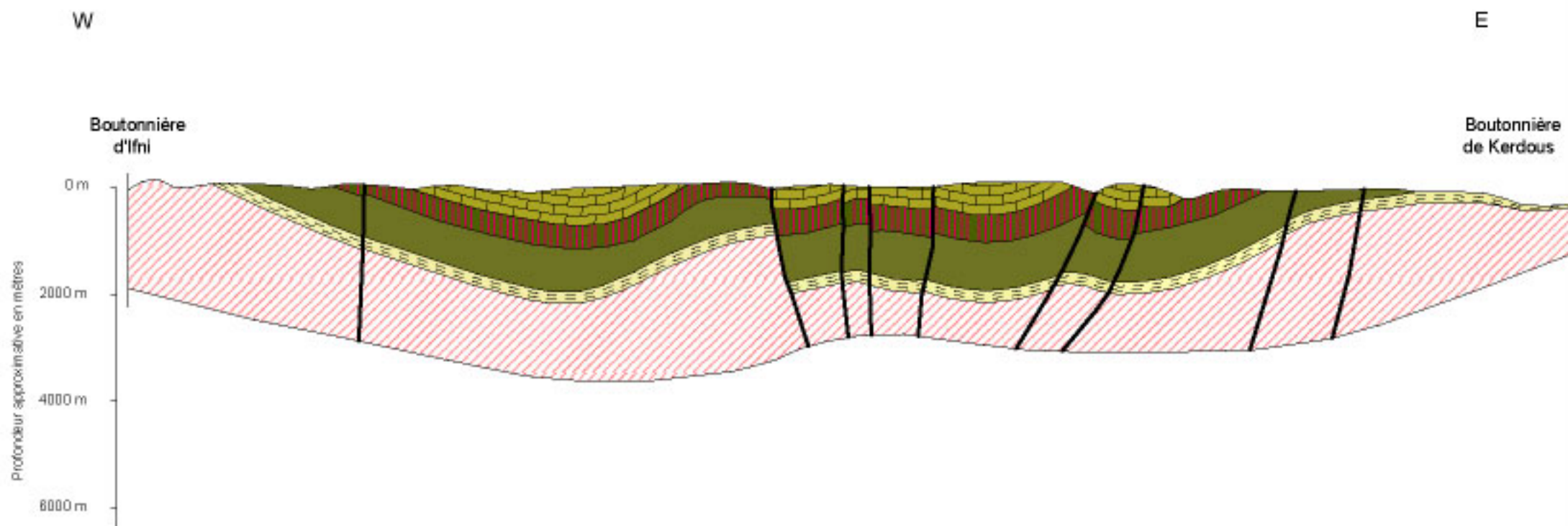
- ville
- Faille
- Tracé de coupes géologiques
- Réseau routier
- Réseau hydrographique
- Quaternaire: limons, calcaires, marnes, alluvions
- Ordovicien: grès, schistes gréseux
- Acadien: schistes verts+grès et quartzites au sommet
- Géorgien: schistes et grès
- Géorgien: calcaires noirs
- Talwinien: dolomie+ marnes: série lie de vin
- Adoudounien Dolomie
- Adoudounien série de base: grès, conglomérat
- Précambrien: rhyolites + andésites




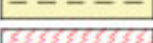


# COUPE I

## Nord-Est du bassin



### LEGENDE

-  FAILLE
-  ORDOVICIEN : GRES, SCHISTES GRESEUX
-  GEORGIEN : CALCAIRES
-  TALVNIEN : DOLOMIES + INTERCALATION DE MARNES
-  ADOUDOUNIEN DOLOMIES
-  ADOUDOUNIEN SERIE DE BASE : GRES, CONGLOMERATS
-  PRECAMBRIEN

0 10 km

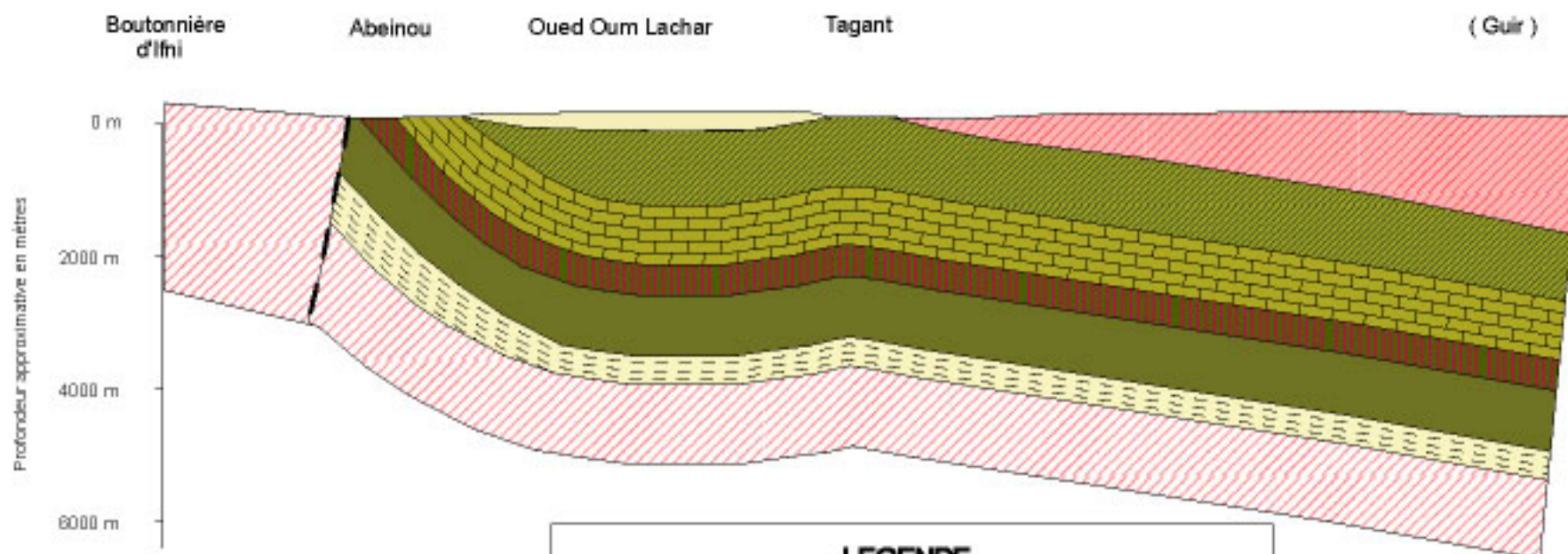


# COUPE II

## Nord-Est du bassin

NW

SE



### LEGENDE

- FAILLE INTERPRETEE
- QUATERNAIRE : LIMONS, CALCAIRES LACUSTRES, ALLUVIONS
- ORDOVICIEN : GRES, SCHISTES GRESEUX
- ACADIEN : SCHISTES
- GEORGIEN : CALCAIRES
- TALMINIEN : DOLOMIES + INTERCALATION DE MARNES
- ADJUDOUNIEN DOLOMIES
- ADJUDOUNIEN SERIE DE BASE : GRES, CONGLOMERATS
- PRECAMBRIEN

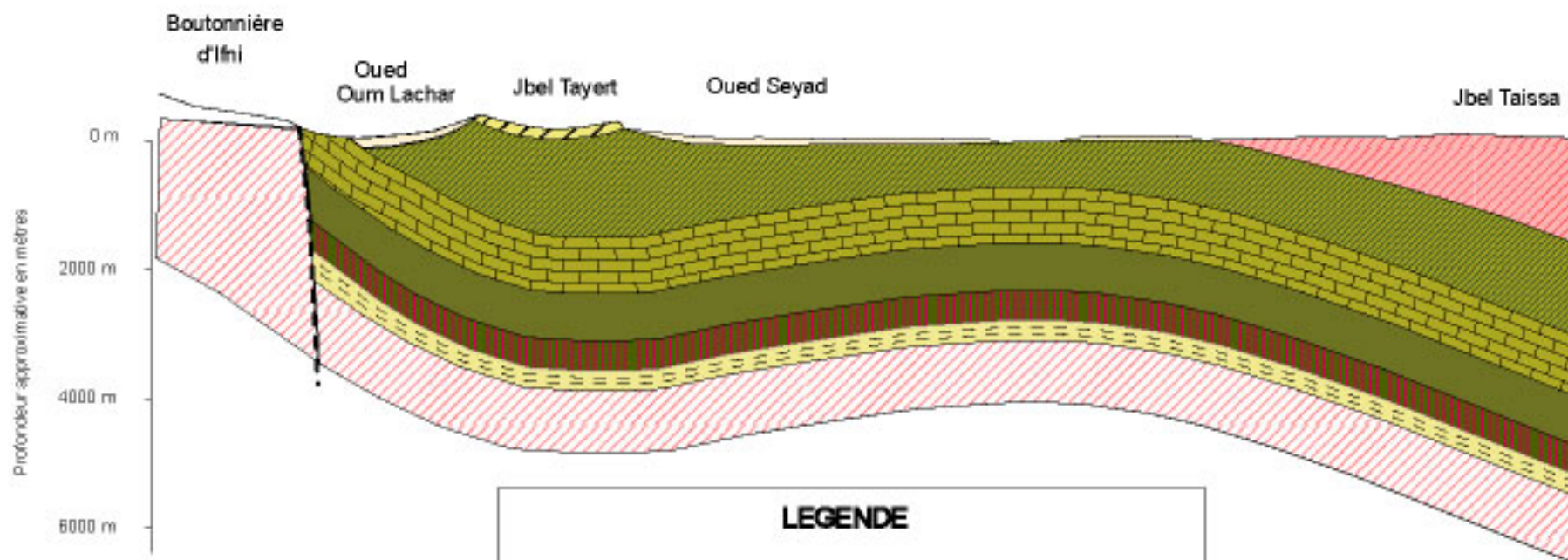
0 4km

# COUPE III

## Centre du bassin

NW

SE



### LEGENDE

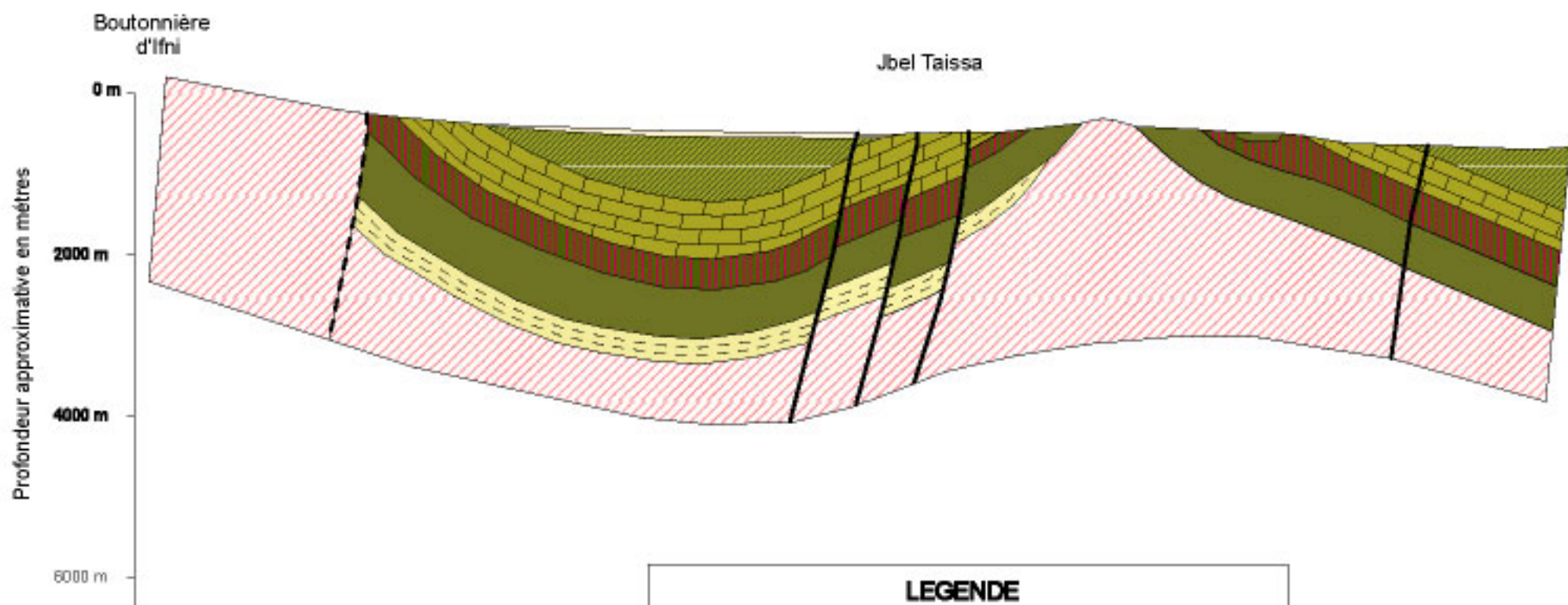
- FAILLE INTERPRETEE
- QUATERNAIRE : LIMONS, CALCAIREE LACUSTRES, ALLUVIONS
- ORDOVICIEN : GRES, SCHISTES GRESEUX
- ACADIEN : SCHISTES
- GEORGIEN : CALCAIRES
- TALMNIEN : DOLOMIES + INTERCALATION DE MARNES
- ADOUDOUNIEN DOLOMIES
- ADOUDOUNIEN SERIE DE BASE : GRES, CONGLOMERATS
- PRECAMBRIEN

0 6 km



# COUPE IV

## Ouest du bassin



### LEGENDE

|                           |  |
|---------------------------|--|
| ---                       | FAILLE INTERPRETEE                                   |
| —                         | FAILLE   |
| ■ (orange)                | QUATERNAIRE : LIMONS, CALCAIREE LACUSTRES, ALLUVIONS |
| ■ (green hatched)         | ACADIEN : SCHISTES                                   |
| ■ (yellow brick)          | GEORGIEN : CALCAIRES                                 |
| ■ (red and black striped) | TALWINIEN : DOLOMIES + INTERCALATION DE MARNES       |
| ■ (green)                 | ADOUDOUNIEN DOLOMIES                                 |
| ■ (yellow dashed)         | ADOUDOUNIEN SERIE DE BASE : GRES, CONGLOMERATS       |
| ■ (red hatched)           | PRECAMBRIEN  |

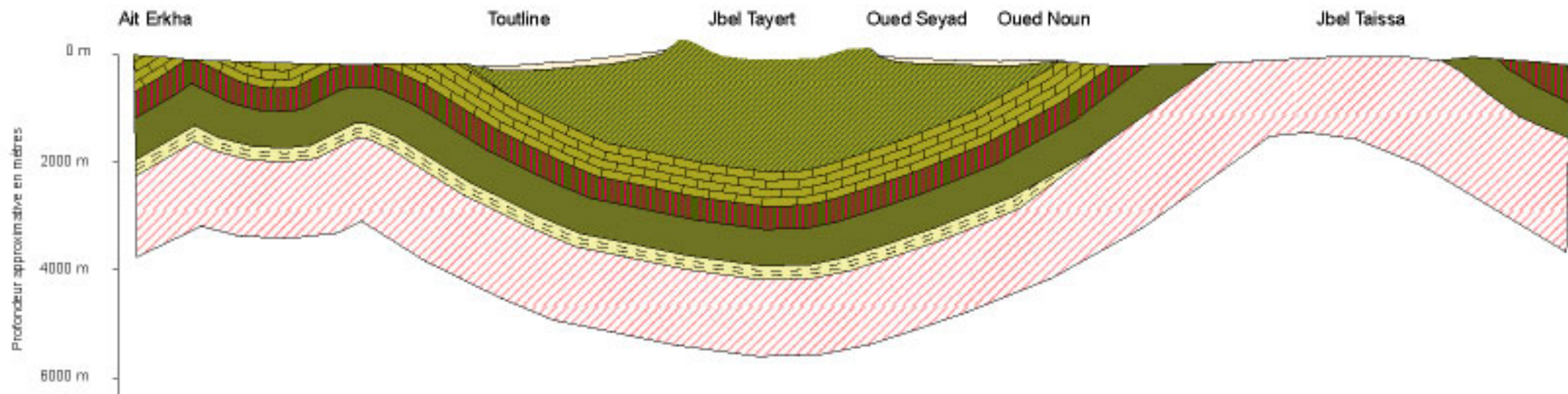
0 6km

# COUPE V

## Centre du bassin

NE

SW



### LEGENDE

|  |  |
|--|--|
|  | QUATERNAIRE : LIMONS, CALCAIREE LACUSTRES, ALLUVIONS |
|  | ACADIEN : SCHISTES                                   |
|  | GEORGIEN : CALCAIRES                                 |
|  | TALWMIEN : DOLOMIES + INTERCALATION DE MARNES        |
|  | ADOUDOUNIEN DOLOMIES                                 |
|  | ADOUDOUNIEN SERIE DE BASE : GRES, CONGLOMERATS       |
|  | PRECAMERIEN  |

0 4 km

### 3.2.4.2 Apport des études géophysiques pour la reconnaissance du substratum

Plusieurs études géophysiques ont été réalisées dans le bassin de Guelmim. Ces études ont consisté en :

- Campagnes géoélectriques (Géoatlas, 1994 et Compagnie Africaine de Géophysique « C.A.G », 1963) ;
- Etudes gravimétriques (Compagnie Africaine de Géophysique) de 1992 ;
- Etudes de sismique réflexion haute résolution (Géoatlas, 1997).

Ces études ont permis d'améliorer les connaissances sur la structure profonde de ce bassin.

#### a - Etude gravimétrique

Cette étude réalisée en février 1992, a permis de définir les secteurs les plus favorables possédant un fort potentiel de fracturation pour une prospection géophysique par sismique réflexion haute résolution.

#### b - Etude géo-électrique

Une première campagne de prospection électrique a été réalisée dans la région en 1963 par la compagnie africaine de géophysique dans l'objectif de déterminer l'allure et la composition du substratum imperméable. Comme certains résultats sont avérés inexacts lors des campagnes de forages récentes, un deuxième essai de cartographie du toit de substratum résistant a été réalisé par Géoatlas en 1994, en employant une densité plus importante en sondages électriques.

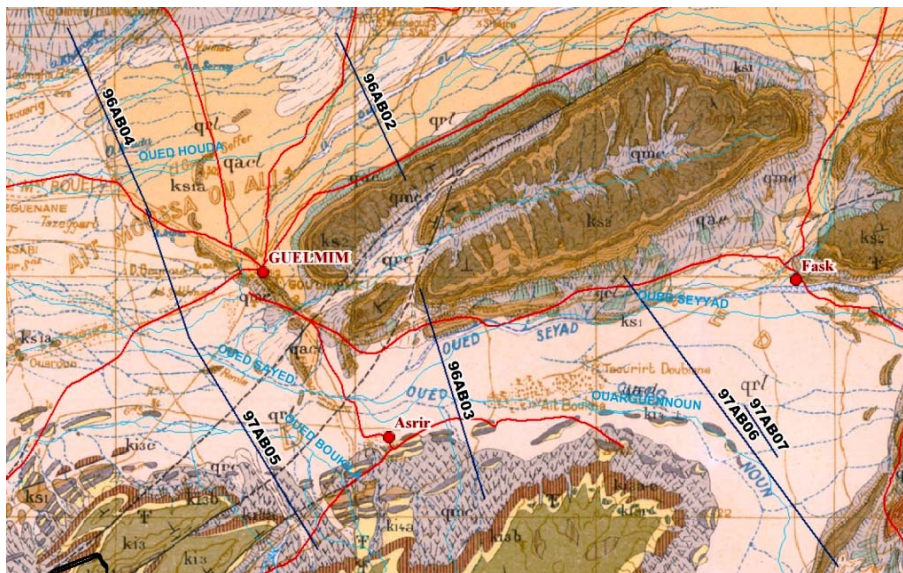
Cette deuxième étude a permis de déterminer la géométrie du toit d'une formation résistante, attribuée en grande partie aux schistes acadiens, constituant le substratum imperméable des formations plioquaternaires aquifères. En effet, les forages de reconnaissance qui ont atteint le substratum résistant montrent que ce dernier est d'âge Géorgien dans la zone d'Andja (schisto-calcaires et schistes gréseux) et Acadien (schisteux) partout ailleurs sous la plaine de Guelmim.

Dans le cadre de la présente étude, la carte du toit du substratum résistant a été élaborée sur la base des données géophysiques disponibles (anciennes cartes, profils sismiques), complétées et corrigées par les résultats de sondages mécaniques réalisés dans la région. Sur 164 forages, seulement 96 ont atteint le socle et ont donc servi pour sa réalisation (Carte 4).

L'allure du toit de substratum obtenue montre que les schistes qui affleurent sur les bordures s'enfoncent progressivement sous la plaine suivant le tracé de l'oued Oum Al Achar et se trouvent bifurqués par les affleurements situés à l'Ouest de la ville de Guelmim et au niveau de l'anticlinal de Jbel Taïssa. Vers l'Est, cette dépression vient se fermer sur les affleurements primaires d'âge Ordovicien. On note également la présence au sein de cette dépression de surcreusements dans la zone de confluence des oueds Seyyad et Ouerguennoun.

### c - Etude par sismique réflexion haute résolution de la plaine de Guelmim :

La campagne de prospection sismique haute résolution a été réalisée en novembre 1998. Elle visait la reconnaissance de la structure des calcaires adoudouniens et géorgiens recouverts par les schistes géorgiens et acadiens ; ainsi que la localisation des failles pouvant les affecter. Les 6 profils sismiques réalisés dans la plaine de Guelmim sont reportés sur la figure suivante :



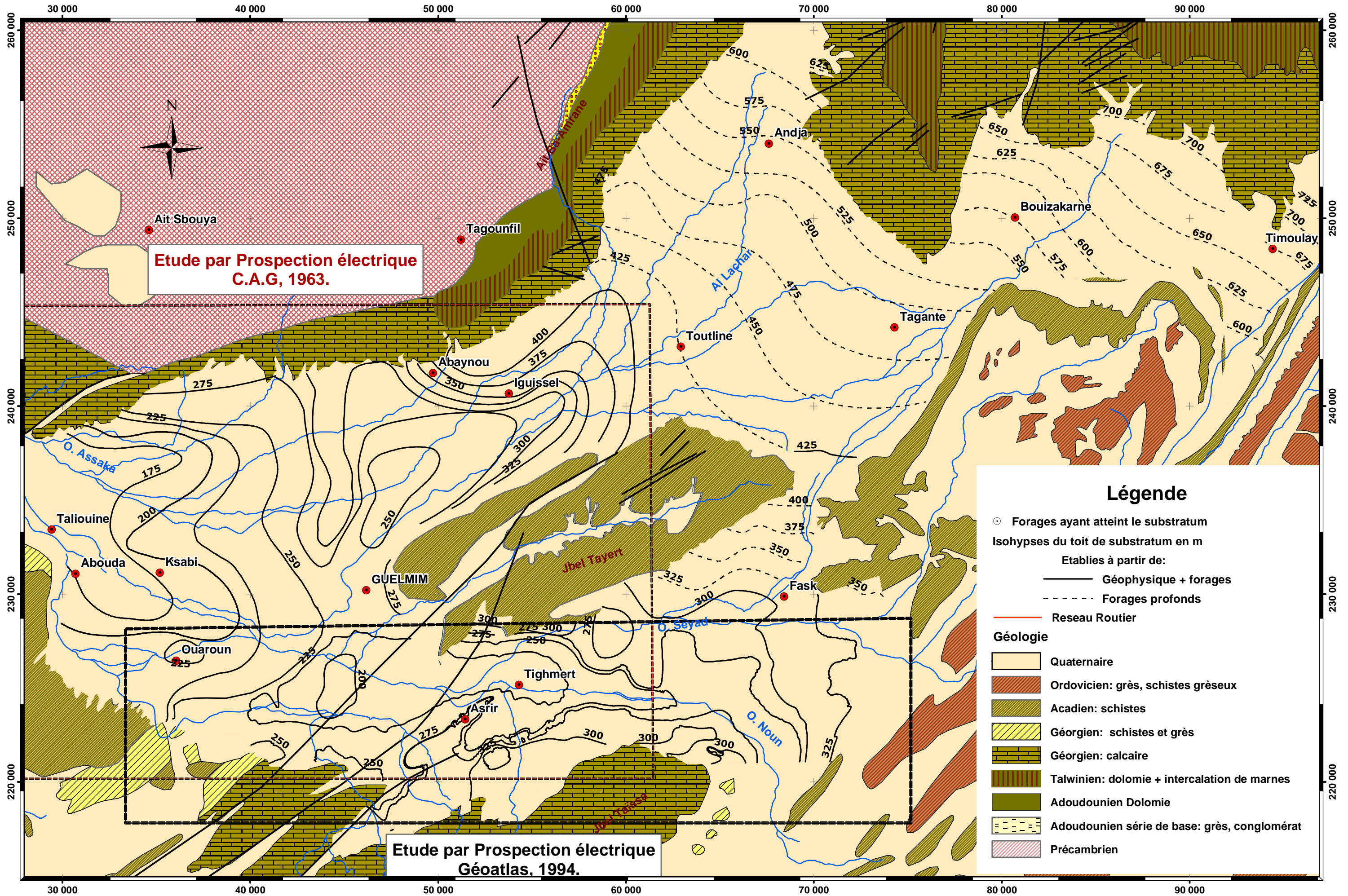
**Figure 13: Plan de situation des profils sismiques**

Sur la base de ces coupes sismiques, la structure en synclinale du bassin de Guelmim a été confirmée, dont le centre coïncide avec le Jbel Tayert. La puissance de la série cambrienne et infracambrienne est estimée à 1500 m ; le toit des calcaires adoudouniens serait ainsi situé, à plus de 2000 m de profondeur par rapport au sol.

La fracturation est également mise en évidence par cette étude, où un système de failles affecte les formations calcaires du Géorgien entre les Jbels Tayert et Taïssa et où des écailles chevauchantes vers le sud (dont l'axe semble être de direction NE-SW) apparaissent nettement.



# Carte 4: Isohypses du toit de substratum d'âge Acadien



**Etude par Prospection électrique  
C.A.G, 1963.**

**Etude par Prospection électrique  
Géoatlas, 1994.**

### Légende

- Forages ayant atteint le substratum
- Isohypses du toit de substratum en m
- Etablies à partir de:
  - Géophysique + forages
  - - - Forages profonds
- Réseau Routier
- Géologie**
- Quaternaire
- Ordovicien: grès, schistes gréseux
- Acadien: schistes
- Géorgien: schistes et grès
- Géorgien: calcaire
- Talwinien: dolomie + intercalation de marnes
- Adoudounien Dolomie
- Adoudounien série de base: grès, conglomérat
- Précambrien



Les profils sismiques réalisés ont servi à la réalisation de la carte du toit des calcaires supérieurs (Carte 6 p.48). L'analyse de cette carte montre l'enfoncement de cette série calcaire depuis, la bordure de l'Anti-Atlas d'Abaynou au Nord jusqu'au Sud du bassin de Guelmim. En effet :

- Avec un pendage de 25 à 35° vers le Sud, les calcaires géorgiens sont à plus de 2000 m au dessous de la ville Guelmim et à quelques centaines de mètres seulement au dessous de la voûte anticlinale de Jbel Taïssa.
- Entre les Jbel Tayert et Jbel Taïssa, ces calcaires sont très tectonisés, avec cependant une absence de failles remontant jusqu'à la base des schistes acadiens. Seuls les calcaires en bordure nord de la plaine, où l'épaisseur des formations schisteuses sus-jacentes n'est pas importante, permettent un contact avec les des formations du Plioquaternaire.

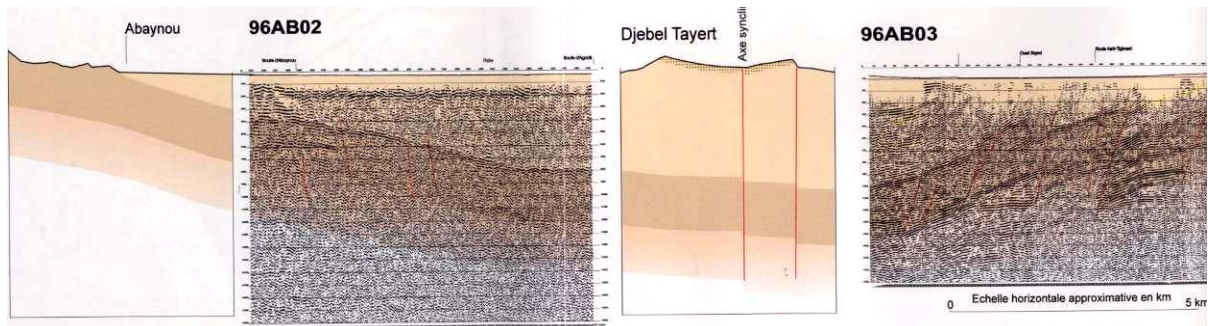


Figure 14: coupes interprétatives des profils sismiques passant à travers le Jbel Tayert

### 3.2.5. STRATIGRAPHIE DES TERRAINS PLIOQUATERNAIRES DE LA PLAINE DE GUELMIM

La stratigraphie des terrains aquifères de la plaine de Guelmim est essentiellement reconnue grâce aux différentes campagnes de sondages effectuées dans la région. Ainsi, une analyse de l'ensemble des paramètres mesurés lors de la foration et des descriptions lithologiques des terrains explorés s'avère nécessaire pour la reconnaissance hydrogéologique de la plaine de Guelmim.

#### 3.2.5.1 Synthèse des résultats de sondages de la région

L'ensemble des données relatives aux forages et puits de la région ont été saisis dans la base de donnée « points IRE » et reportés sur fond topographique (Carte 5). Une analyse statistique des paramètres mesurés lors de la foration des sondages a permis de dégager une vue synthétique des connaissances acquises sur l'aquifère de la plaine de Guelmim. L'analyse a porté sur les paramètres suivants :

- La profondeur totale du forage ;
- La lithologie;
- La profondeur des venues d'eau ;
- Les débits des venues d'eau.

### a - La profondeur

La profondeur moyenne des forages réalisées dans la plaine de Guelmim est 63.2 m. La figure suivante donnant la répartition des ouvrages en fonction de la profondeur montre que les profondeurs les plus fréquentes sont comprises entre 20 et 50m.

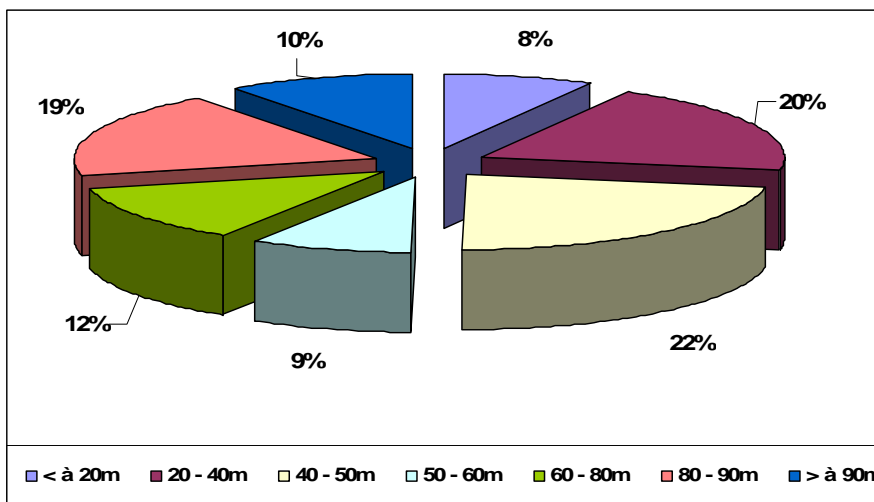


Figure 15 Répartition des forages en fonction de la profondeur

Certains forages ont atteint des profondeurs très importantes: 278 m dans le sondage N° IRE 961/88, 295 m dans le sondage N° IRE 829/88, 427m dans le forage N° IRE 50/88 d'Andja et 800 m dans le sondage N° IRE 1330/88.

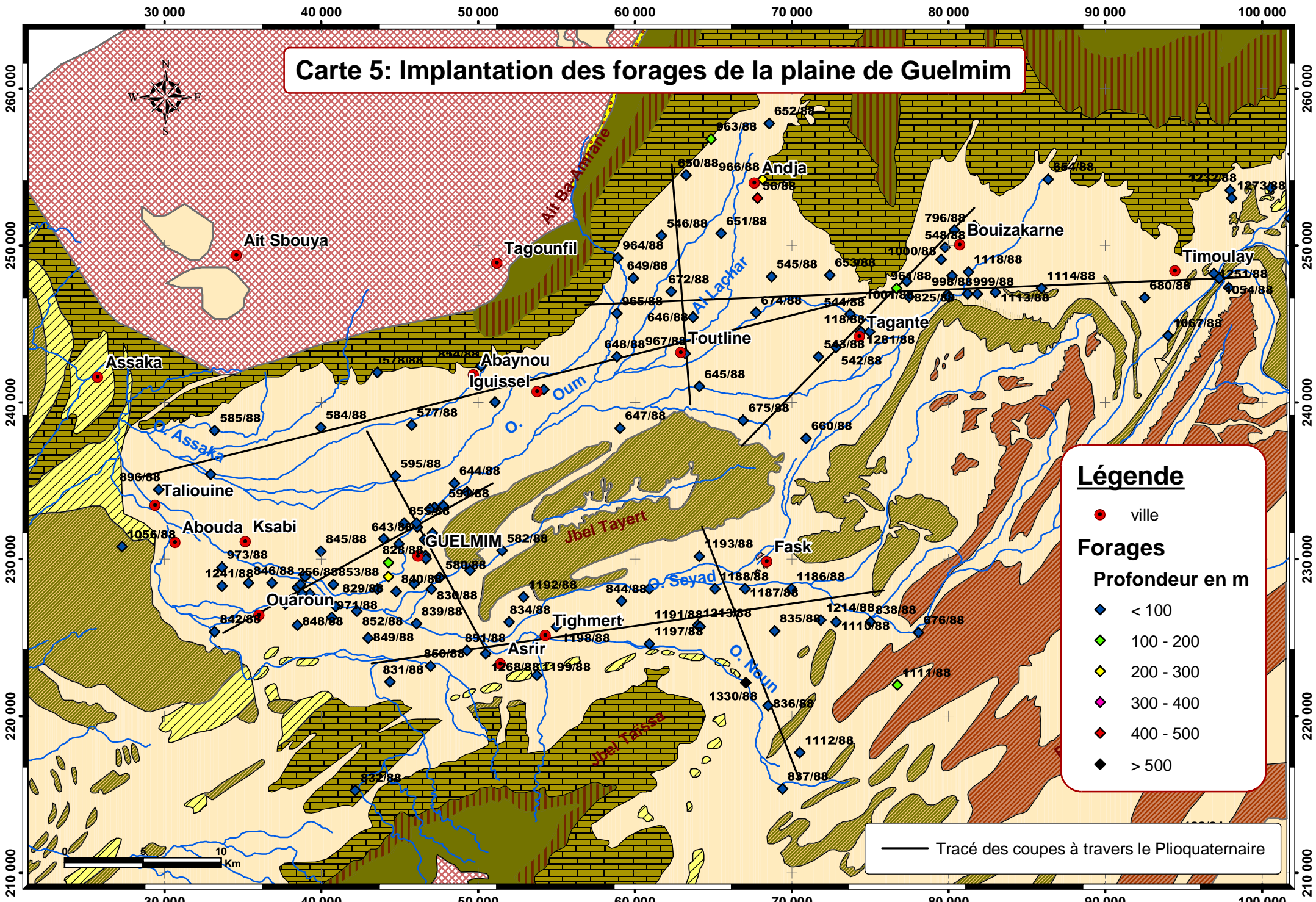
### b - La lithologie

De l'examen des différentes coupes lithologiques, on constate que la structure générale du bassin de Guelmim est formée de la succession des formations suivantes :

- A la base des schistes acadiens avec intercalation parfois de niveaux gréseux, des quartzites ou des schisto-calcaires du géorgien dans la région d'Andja;
- Un horizon argileux et argilo-sableux comportant parfois des traces d'alluvions très aquifères;
- 2 horizons présents le plus souvent en alternance :
  - Un horizon calcaire plus ou moins marneux, quelquefois encroûté en surface;
  - Un horizon marneux, marno-argileux ou marno-calcaire mais à forte teneur en marnes, remplacé par un horizon de marnes sableuse dans la région de Bou Izakarn;
- Un horizon de formations récentes peu épaisses comportant des alluvions polygéniques, des limons d'épandage, des galets et des sables hétérogènes.

Ces différents horizons lithologiques présentent tous d'importantes variations d'épaisseur et sont parfois totalement manquant dans certains endroits.

**Carte 5: Implantation des forages de la plaine de Guelmim**



**Légende**

- ville

**Forages**

**Profondeur en m**

- ◆ < 100
- ◆ 100 - 200
- ◆ 200 - 300
- ◆ 300 - 400
- ◆ 400 - 500
- ◆ > 500

— Tracé des coupes à travers le Plioquaternaire

### c - Les venues d'eau

Tous les forages ont été exécutés par la méthode du Marteau Fond de Trou à l'air ce qui a permis une bonne reconnaissance des horizons humides ou aquifères. L'axe directeur de l'implantation de ces forages était l'existence de zones fissurées décelées par interprétation géomorphologique sur photographies aériennes. Ainsi, sur un total de 164 forages, 71% sont positifs dont 87% ont rencontrés plus d'une venue d'eau (3 en moyenne).

Comme l'illustre le graphique suivant, les premières venues d'eau sont fréquemment rencontrées entre 10 et 30 m. la profondeur moyenne est de 29m.

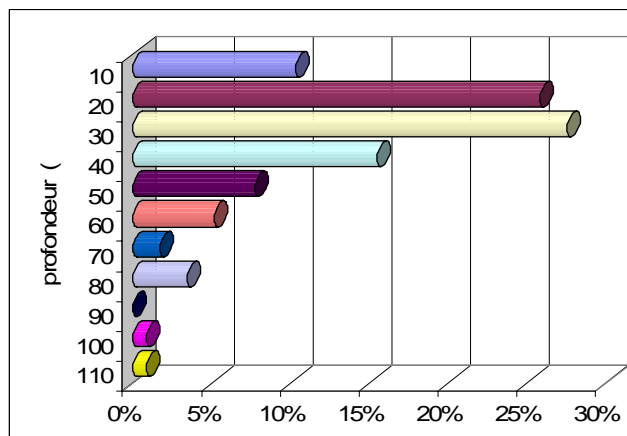


Figure 16 : Répartition des 1ères venues d'eau par tranche de profondeur

### d - Les débits

Les débits obtenus par l'essai à l'air Lift varient entre quelques l/s à 17 l/s. le débit moyen est de 4 l/s soit 13 m<sup>3</sup>/h. Les débits les plus significatifs sont rencontrés dans les profondeurs entre 30 et 87 mètres, qui correspondent le plus souvent aux niveaux des formations lacustres (calcaires ou alluvions) et/ou à la tranche altérée des schistes acadiens. La remarque générale est que la productivité des forages est très hétérogène soit à cause des variations latérales des faciès soit à cause de la circulation karstique dans les calcaires

#### 3.2.5.2 Lithologie des terrains de surface

La carte de la lithologie de surface élaborée dans la présente étude (Carte 7), montre que le Plioquaternaire est représenté par des regs et éboulis aux pieds des reliefs, des alluvions autour des oueds, des affleurements de calcaires lacustres encroûtés en surface dans la zone d'Andja et Bou Izakarne, des dunes de sables au S-W de la plaine et des limons salins localisés en amont de Ouarguennoun. Le reste de la plaine est couvert de limons.

#### 3.2.5.3 Lithostratigraphie du Plioquaternaire

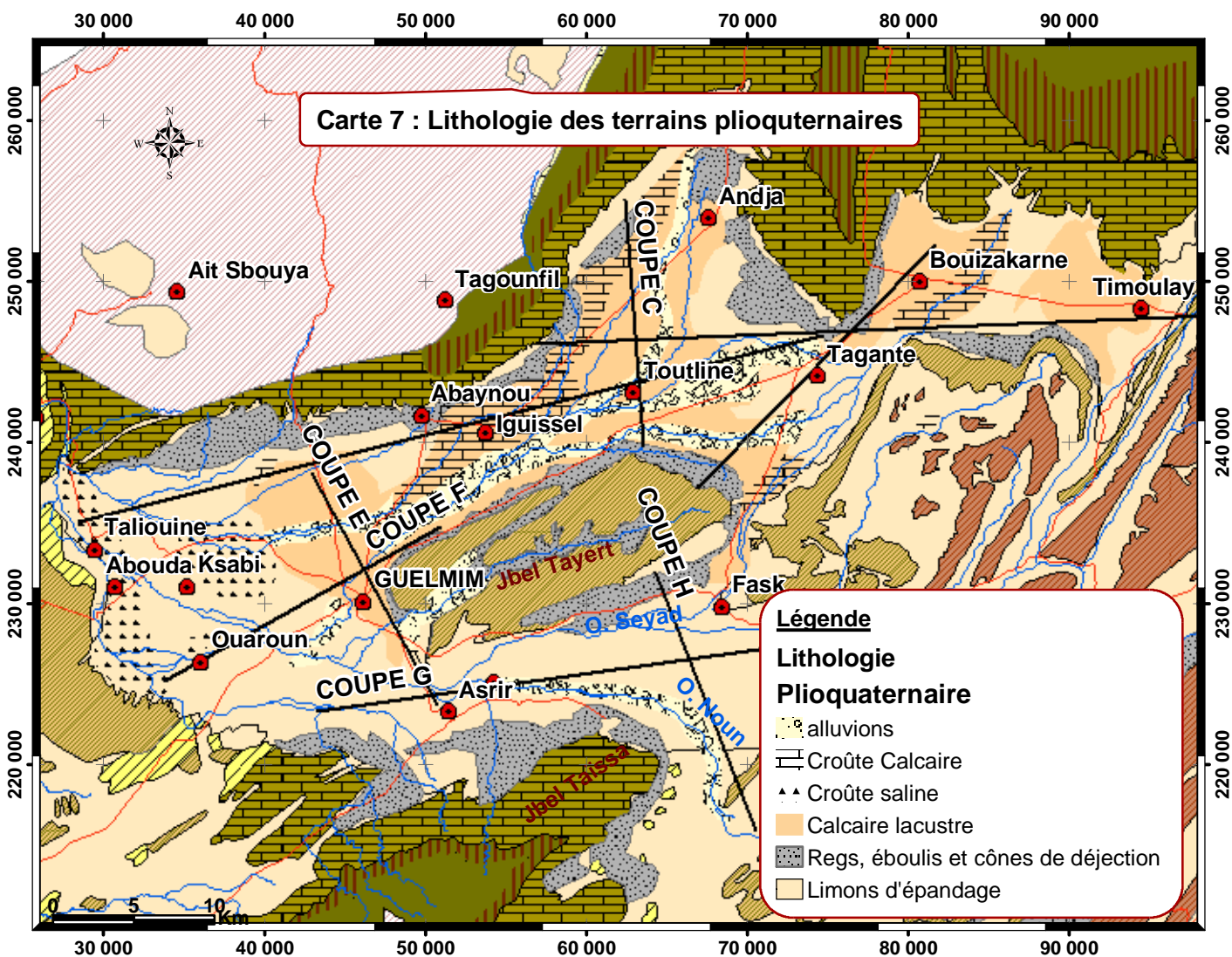
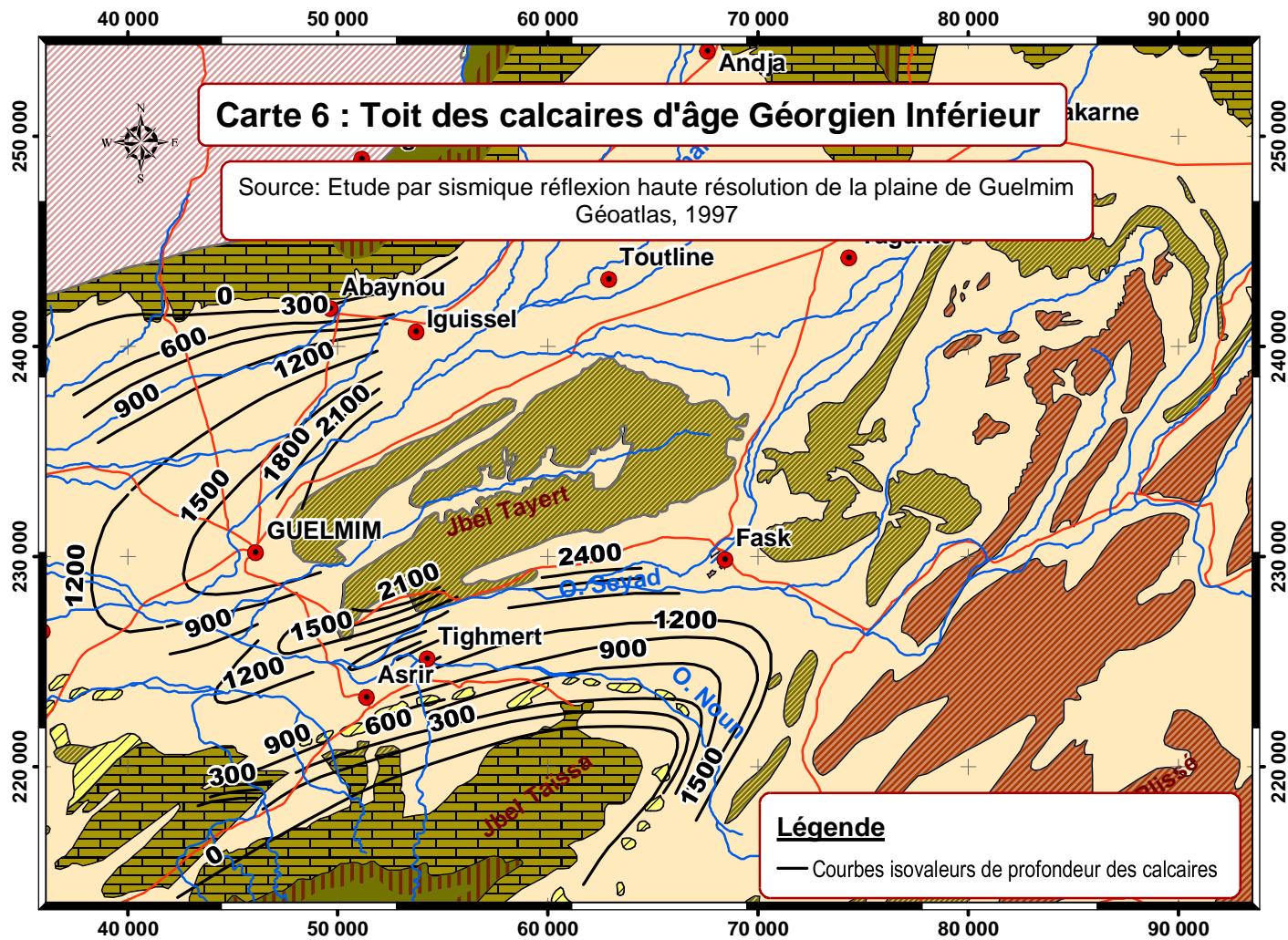
Dans le but de décrire la stratigraphie des terrains plioquaternaires qui a été très peu étudiée jusqu'à présent, nous avons exploité l'ensemble des coupes lithologiques dressés lors des différentes campagnes de forages pour la connaissance de la stratigraphie des formations plioquaternaires de la plaine de Guelmim. Ainsi, une série de 8 coupes géologiques (A jusqu'à H), a été élaboré (Figures

17). Le raccordement entre les forages ayant servi à la réalisation de ces coupes n'était pas évident à cause des imprécisions et de l'hétérogénéité entre les levés lithologiques.

**Tableau 5: Colonne stratigraphique synthétique du Plioquaternaire de la plaine de Guelmim**

|                 | Unité   | <u>Unités stratigraphiques</u>  |
|-----------------|---------|---|
| Plioquaternaire | Unité 4 | <ul style="list-style-type: none"> <li>–Reqs éboulis et cônes de déjection au pied des reliefs</li> <li>–Croûte calcaire, croûte saline</li> <li>–Alluvions, sables et galets autour des cours d'eau, limons d'épandage sur la plaine.</li> </ul>   |
|                 | Unité 3 | Alternance de : <ul style="list-style-type: none"> <li>–Calcaires lacustres</li> <li>–Marnes sableuses passant latéralement à des argiles sableuses</li> <li>–Calcaire marneux à marno-calcaire avec des passages de sables</li> <li>–Présence d'alluvions de lits fossiles au dessous de ces formations</li> </ul> |
|                 | Unité 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>–Conglomérat</li> <li>–Argiles et argiles marneuses</li> </ul>   |
| Acadien         | Unité 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>–Schiste altéré en surface avec inclusion de niveaux gréseux</li> </ul>  |

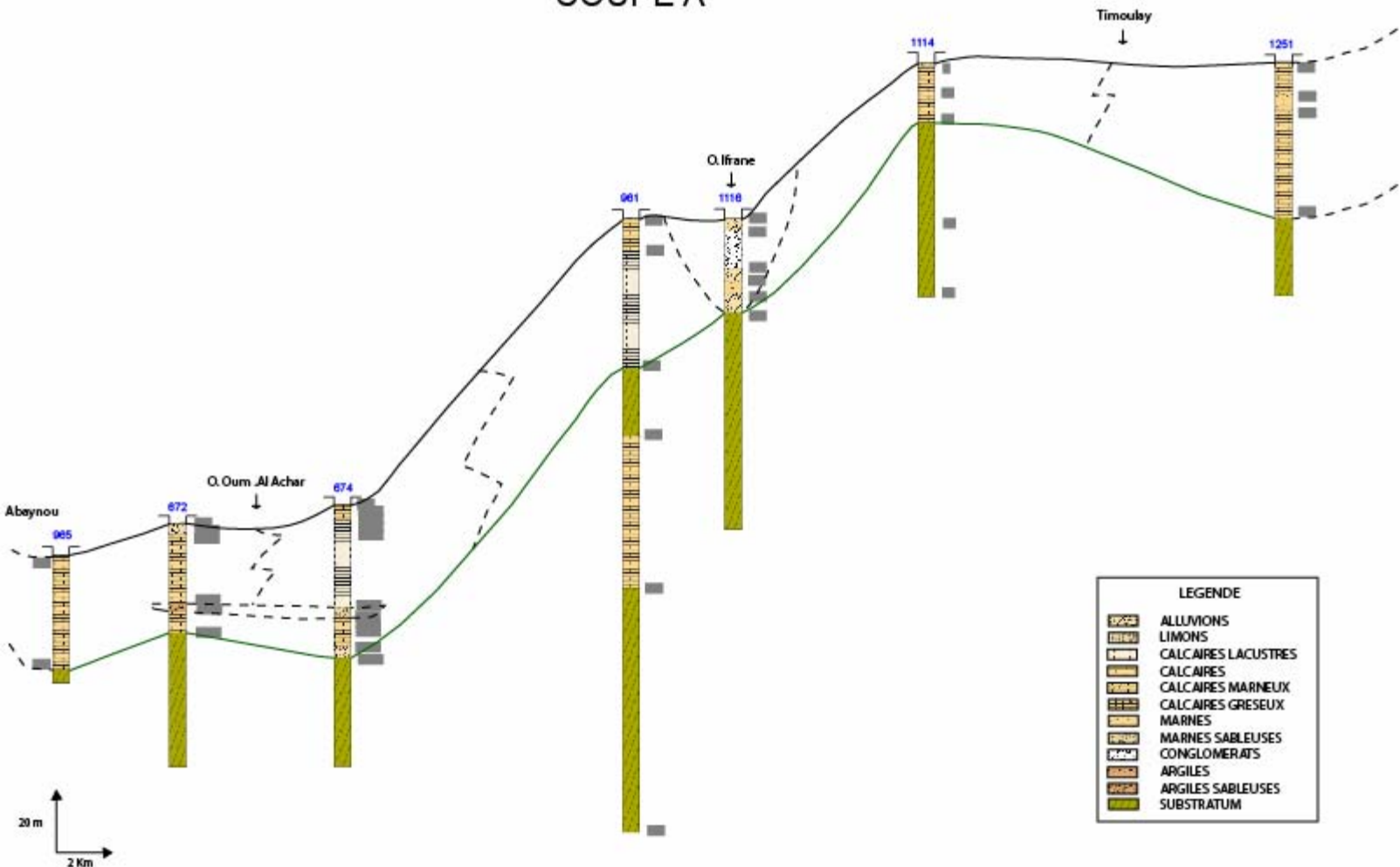




W

## COUPE A

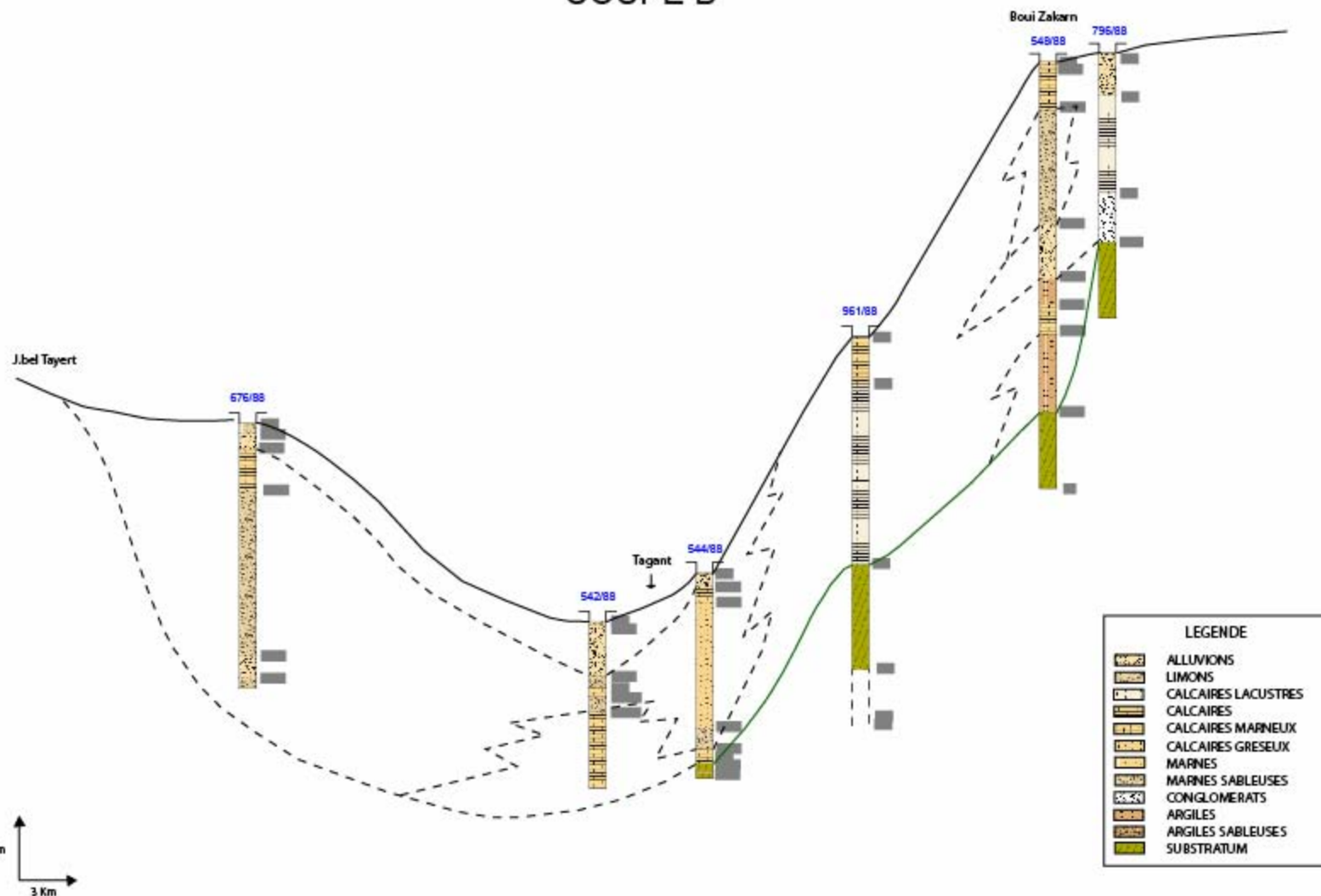
E



SW

NE

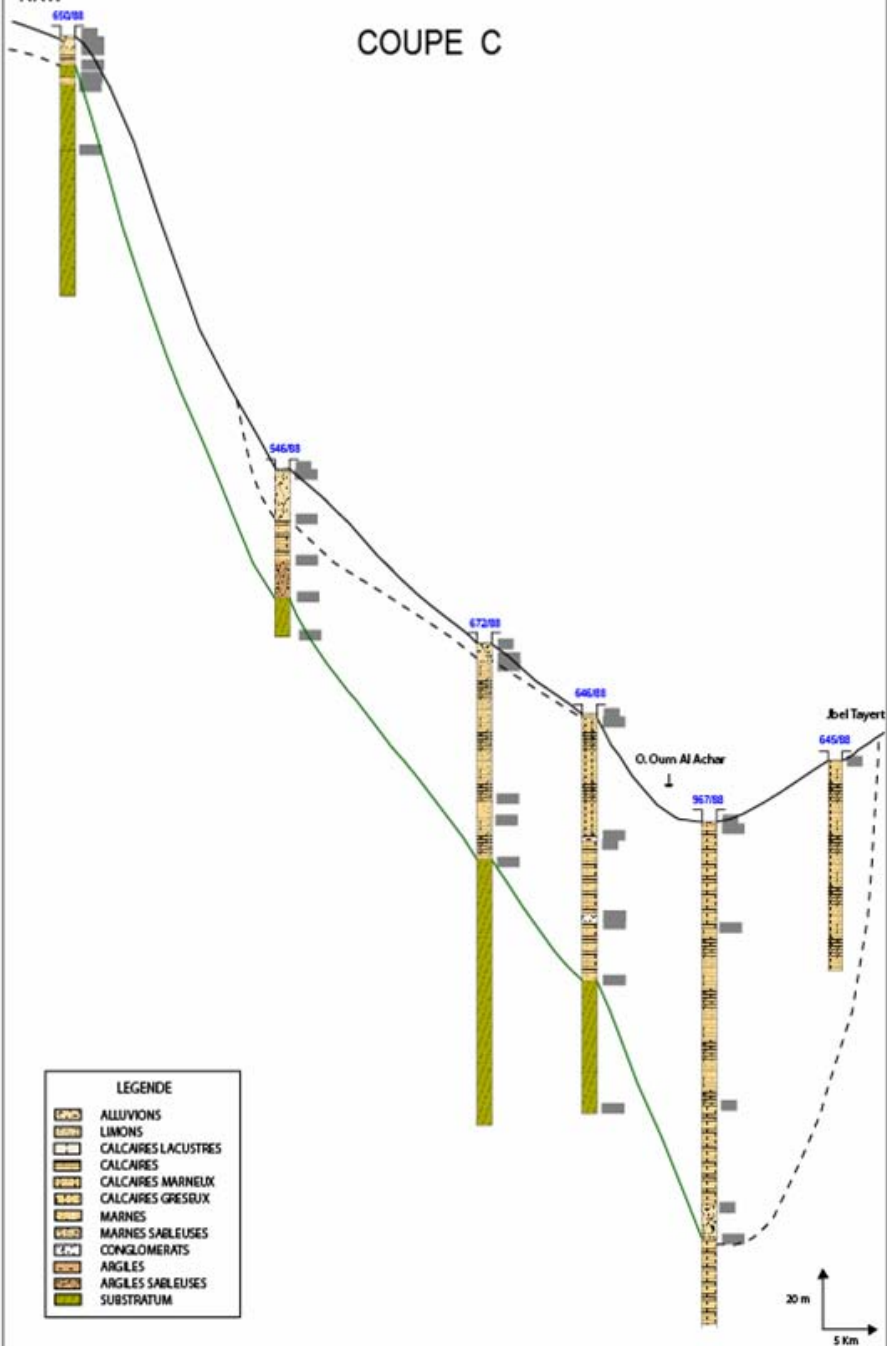
## COUPE B





## COUPE C

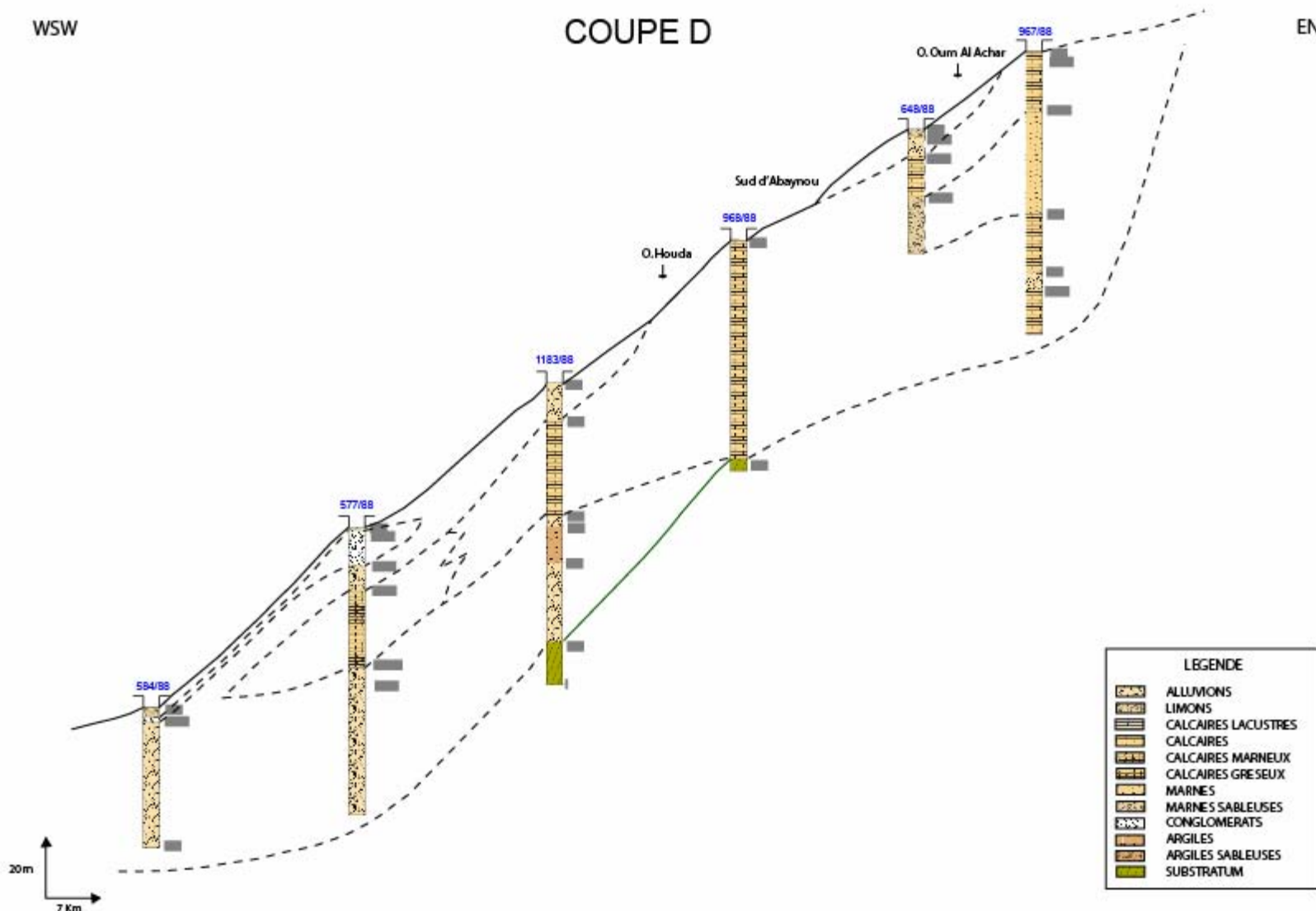
NNW



WSW

## COUPE D

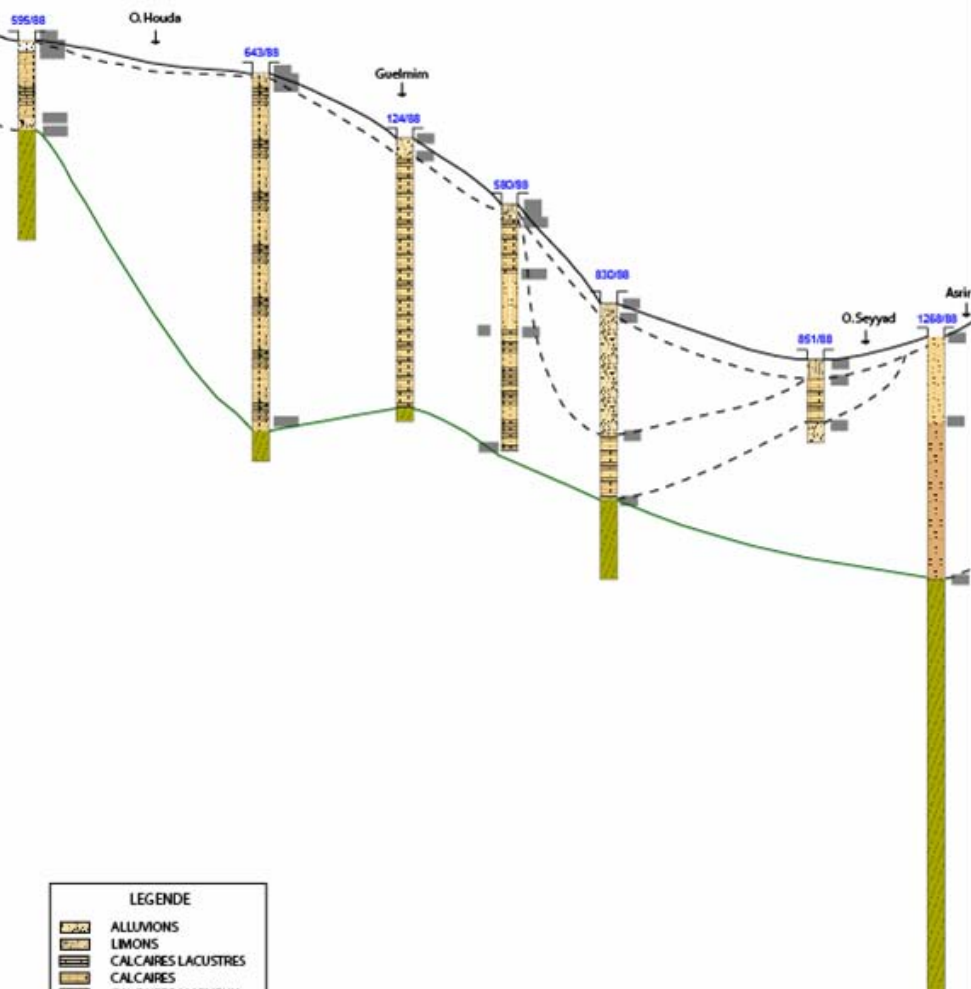
ENE



NNW

## COUPE E

SSE

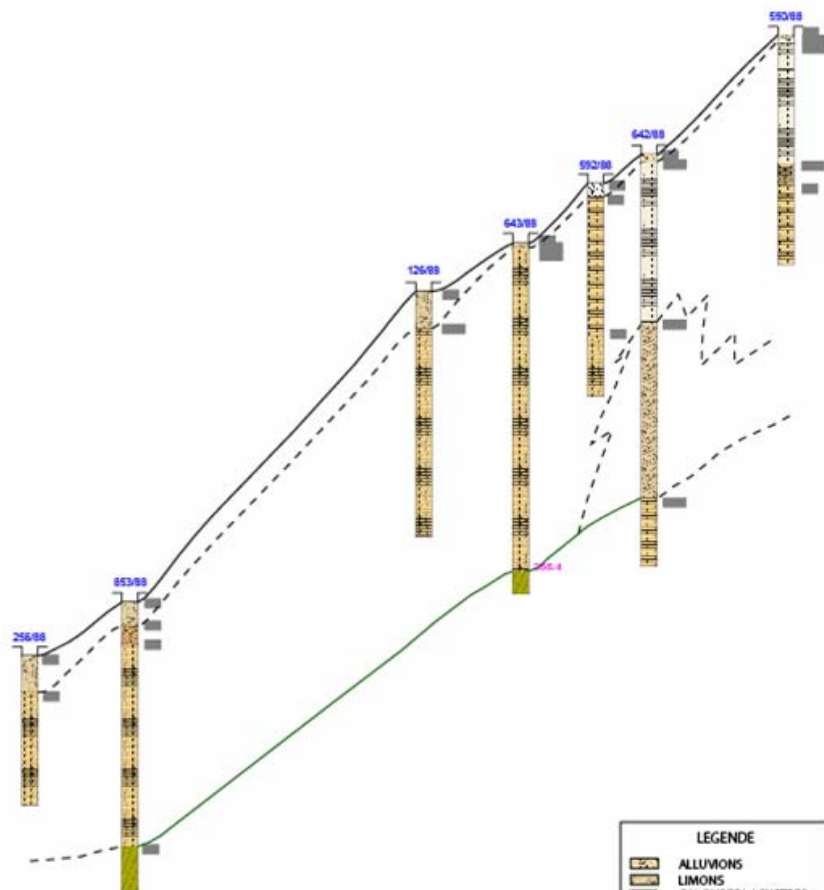


## LEGENDE

|  |                     |
|--|---------------------|
|  | ALLUMONS            |
|  | LIMONS              |
|  | CALCAIRES LACUSTRES |
|  | CALCAIRES           |
|  | CALCAIRES MARNEUX   |
|  | CALCAIRES GRESEUX   |
|  | MARNES              |
|  | MARNES SABLEUSES    |
|  | CONGLOMERATS        |
|  | ARGLES              |
|  | ARGLES SABLEUSES    |
|  | SUBSTRATUM          |



## COUPE F



## LEGENDE

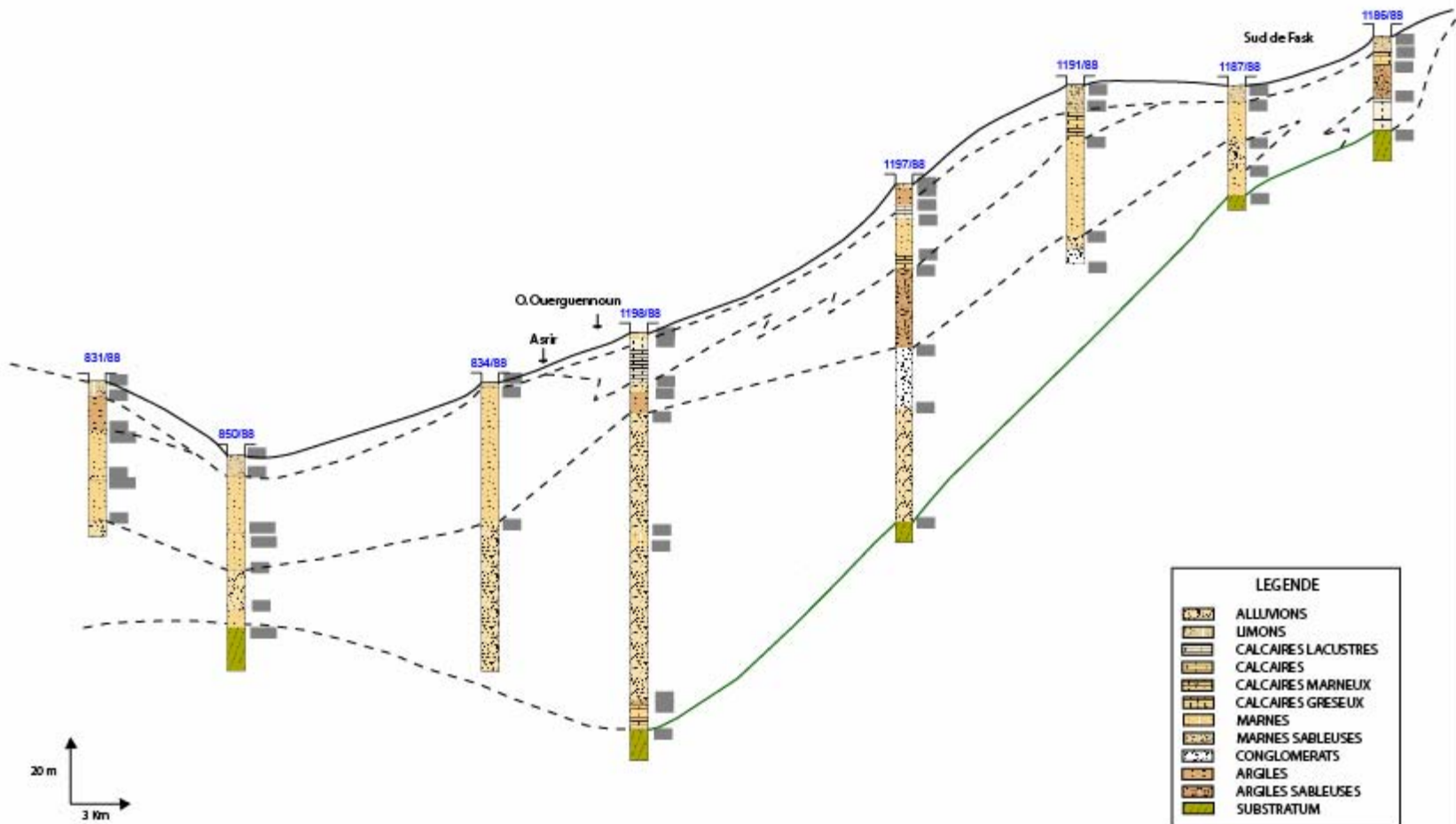
|  |                     |
|--|---------------------|
|  | ALLUVIONS           |
|  | LIMONS              |
|  | CALCAIRES LACUSTRES |
|  | CALCAIRES           |
|  | CALCAIRES MARNEUX   |
|  | CALCAIRES GRESEUX   |
|  | MARNES              |
|  | MARNES SABLEUSES    |
|  | CONGLOMERATS        |
|  | ARGILES             |
|  | ARGILES SABLEUSES   |
|  | SUBSTRATUM          |



WSW

ENE

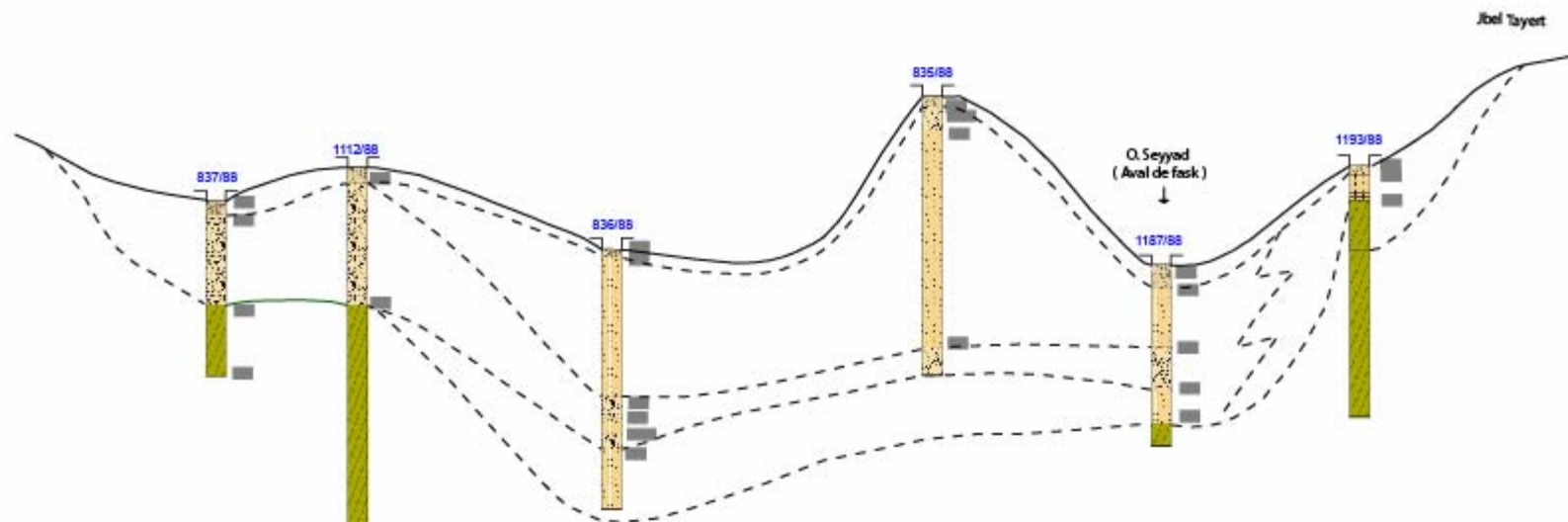
## COUPE G



SSE

## COUPE H

NNW



## LEGENDE

|  |                     |
|--|---------------------|
|  | ALLUMONS            |
|  | LIMONS              |
|  | CALCAIRES LACUSTRES |
|  | CALCAIRES           |
|  | CALCAIRES MARNEUX   |
|  | CALCAIRES GRESEUX   |
|  | MARNES              |
|  | MARNES SABLEUSES    |
|  | CONGLOMERATS        |
|  | ARGILES             |
|  | ARGILES SABLEUSES   |
|  | SUBSTRATUM          |

Les corrélations stratigraphiques établies ont permis de dégager les principales unités stratigraphiques, composant la couverture plioquaternaire du bassin de Guelmim. En effet :

Les observations de l'unité litho-stratigraphique U4 montrent que les dépôts sédimentaires ont une répartition spatiale et des épaisseurs très inégales :

- Vers l'Est de la plaine, on trouve des glacis d'érosion en regs accrochés aux lits des montagnes. Ces regs passent latéralement à des cônes d'éboulis en bordure de l'Anti-Atlas massif. Le long des oueds Seyyad et Maït, se trouvent des étendues d'alluvions caillouteuses, assimilées aux regs récents.
- Les cônes d'éboulis sont rencontrés au pied des crêtes quartzitiques du Jbel Tayert et dans le Bani. Les cônes de déjection, constituant les affleurements étendus au pied des massifs montagneux, sont surmontés d'une croûte calcaire dans la partie occidentale du bassin, soumise à une influence atlantique (dans le pourtour de Jbel Taïssa).
- Les calcaires lacustres présentent des encroûtements en surface depuis Andja et Bou Izakarn jusqu'à l'arc des collines de Guelmim. Ces croûtes calcaires tendent à disparaître vers l'Est de la plaine.
- Les croûtes salines superficielles sont développées sur la rive droite de l'oued Assaka jusqu'à Ksabi-Tisguenane. Les formations de cette zone sont très riches en gypse.
- La plaine de Taïdalt au sud et la partie amont-ouest de la plaine de Noun-Tighmert sont couvertes par des formations sableuses. Les dépôts alluvionnaires couvrent essentiellement les lits d'oueds. Les limons d'épandage, d'une épaisseur généralement inférieure à 2 mètres, s'étendent largement sur le reste de la plaine.

L'unité litho-stratigraphique U3 comprend les principales formations lacustres de la région. En général, cette unité se caractérise par des passages de faciès de dimensions très variables : faibles aux environs de Andja et de Guelmim, plus importantes dans la vallée de l'oued Seyyad-Ouerguennoun. En effet:

- Les calcaires lacustres couvrent de vastes étendues notamment dans les Feijas de Guelmim et Bou Izakarn et dans les falaises de Ksabi-Tisguenane et Ouaroun. Ils passent à des conglomérats dans les zones de piémont à Ifrane (coupe A), à des marno-calcaires puis des marnes dans la vallée de Seyyad-Ouerguennoun (coupes G et H) et sont totalement remplacés par des argiles à Asrir (au niveau du forage 1268/88) et par des marnes plus ou moins calcaires entre Fask et Jbel Taïssa (vallées des oueds Seyyad-Ouerguennoun). Ces calcaires sont bien développés dans le couloir de Tagant à Bouizakarn. Leur épaisseur atteint 48 mètres au niveau du forage 961/88.
- Les calcaires lacustres alternent avec des niveaux marno-calcaires et marno-sableux dans la plaine de l'oued Oum Al Acharà l'Ouest de Guelmim (coupes F et B). Des bancs de marnes, (d'épaisseur ne dépassant pas 10 mètres), s'intercalent entre ces niveaux relativement perméables dans la zone ouest entre Guelmim et Taliouine (coupe D).
- Localement dans la zone des oueds Seyyad-Ouerguennoun (coupe H) et en aval d'Abaynou (coupe E), se rencontrent des alluvions assez grossières témoignant de la présence de lits fossiles qui suivent approximativement le tracé des cours d'eau, actuels.

- Des niveaux d'argile sableuse d'épaisseur généralement inférieure à 7 mètres au sud de Fask et d'Abaynou (coupe I et coupe E), pouvant atteindre 16 mètres sur le tracé actuel de l'oued Ouerguenoun (coupe H).

L'unité litho-stratigraphique U2, moins épaisse que les précédentes, se trouve notamment dans la vallée de l'oued Seyyad-Ouerguenoun. Elle comporte des lits conglomératiques surmontant une série argileuse parfois difficilement différenciable des produits d'altération des schistes situés à sa base.

L'unité litho-stratigraphique U1, disposant de quelques venues d'eau, n'est pas présente sur toute la zone d'étude. Elle comporte les produits d'altération des schistes acadiens, mélangés parfois à des sables ou des alluvions polygéniques.

### 3.2.6. CONCLUSION

La synthèse des données géologiques du bassin de Guelmim a permis d'améliorer les connaissances sur la structure profonde du bassin de Guelmim, l'agencement des formations constituant le substratum et la variation spatiale des dépôts plioquaternaires. En effet, il s'agit d'un synclinorium, dont le centre est représenté par le Jbel Tayert. Ce dernier est couronné par les barres quartzitiques (ou «barres de Guelmim») qui constituent le membre terminal de l'Acadien. Les terrains de part et d'autre de ces reliefs sont constitués par les dépôts de couverture du Plioquaternaire qui surmontent les schistes acadiens du substratum.

Les bordures de la plaine sont constituées par des terrains plus anciens qui correspondent à des cœurs d'anticlinaux qui font remonter le Précambrien du côté des boutonnières d'El Kerdous au NE et d'Ifni au NW et au niveau des Jbels Taïssa et Guir au SW. Au SE, affleurent des terrains plus récents datés de l'Ordovicien, correspondant au flanc SE de l'anticlinal, dont le cœur serait situé dans l'axe de Jbel Taïssa.

Concernant la déformation cassante, les failles détectées par la géophysique n'affectent que les calcaires de l'Infracambrien et du Géorgien. Quant aux dépôts plioquaternaires, leur importance a été mise en évidence essentiellement sur la base des résultats des forages réalisés. Les unités définies sont caractérisées par une grande variation latérale d'épaisseur et de faciès. Ainsi, quatre unités différentes ont mises en évidence les formations dominantes (unité 3) et sont constituées principalement de calcaires lacustres (notamment dans la partie nord de la plaine), de marno-calcaires et des marnes sableuses qui dominent la partie Sud du bassin.



### **3.3. HYDROGEOLOGIE**

#### **3.3.1. GENERALITES SUR LES AQUIFERES DE LA REGION**

De point de vue géologique et hydrogéologique, plusieurs formations sont susceptibles d'emmagasiner de l'eau au niveau de la plaine de Guelmim et sont décrites ci-après:

##### **3.3.1.1 Les formations du Plioquaternaire**

La grande majorité des points d'eau exploitent dans les ressources de ces formations constituées de matériaux variés déposés entre le Villafranchien et le Quaternaire récent.

##### **3.3.1.2 Les formations acadiennes**

Ils affleurent en arc vers l'Ouest et le Nord et au niveau de Jbel Tayert au centre de Guelmim et atteignent une puissance de plus de 2000 m. ils constituent de très mauvais aquifères et produisent généralement des débits inférieurs à un l/s. Seule la frange altérée et fracturée en surface des schistes qui constituent un aquifère continu avec les formations d'âge plioquaternaire. La puissance de cette zone altérée varie de 0.5 à 10 m suivant le degré de fracturation.

##### **3.3.1.3 Les formations ordoviennes**

Ils affleurent dans le domaine Ouest et constituent le substratum du Haut du domaine S-E du bassin de Guelmim. Ces formations sont très peu perméables.

##### **3.3.1.4 Les formations géorgiennes**

Constitués de calcaires inférieurs, supérieurs et ceux de la série schisto-calcaire. Ils constituent la bordure de l'anticlinal de Jbel Guir et Taïssa, et la limite Nord avec les reliefs de l'Akhssas, Aït Erkha et Ifrane. Les ressources en eau du Géorgien sont très limitées dans les reliefs (au niveau de Jbel Taïssa aucune source ne s'est manifesté) et difficilement accessibles d'une part à cause de la discontinuité du réseau karstique et d'autre part du fait de la présence d'argile dans les produits d'altération.

Par contre au niveau de la plaine, ils se manifestent uniquement par des sources sur la bordure Nord et Nord-Est de la plaine où ces aquifères sont en contact direct avec ceux du Plioquaternaire (sources Timoulay et Iguissel au Nord-Est).

##### **3.3.1.5 Les formations adoudouniennes**

Constitués de calcaires dolomitiques et dolomies rencontrés au Nord dans le plateau des Akhssas et au Sud sur le Jbel Guir, ces formations ne contribuent qu'au niveau du contact direct avec les formations géorgiennes comme c'est le cas de la région d'Abaynou où on rencontre une source thermale portant le même nom (la présence de formations d'âge Talwinien entre ces deux formations limite cet échange aux zones de fractures).

## Aquifère à étudier

Deux grands systèmes aquifères s'individualisent dans la plaine de Guelmim: la nappe « profonde » des calcaires adoudouniens et géorgiens de l'Anti-Atlas, et la nappe phréatique contenue dans les formations d'âge Plioquaternaire ou nappe « de Guelmim », qui est la plus exploitée dans la région. En effet, la nappe plioquaternaire est très largement étudiée et suivis de près par la DRH (forages, suivi de la piézométrie, essais de pompage, mesures hydrochimiques, ...).

Par contre, la nappe des calcaires géorgiens et adoudouniens est très peu étudiée en raison des forts profondeurs de son toit sous la plaine. La plupart des forages exécutés pour explorer dans les horizons profonds étaient sans succès. Seuls les forages de la bordure Nord et Nord-Est de la plaine (Figure 18) ont rencontrés le socle cambrien. Il s'agit de:

- L'ancien forage d'Andja (N° IRE 56/88) qui a traversé la série schisto-calcaire sur 136 m, et les calcaires inférieurs sur 427 m. Cependant, le dispositif utilisé lors du pompage d'essai dans ce forage n'a pas permis de déterminer si l'alimentation provenait des couches profondes ou des couches superficielles.
- Les forages de la région de Timoulay-Ifrane (N° IRE 652/88, 961/88, 966/88) qui ont aussi exploré la série schisto-calcaire d'âge géorgien.
- Les forages N° IRE 578/88, 1330 et 854/88 de la bordure Sud de l'anti-atlas qui ont atteint les dolomies d'âge Adoudounien.

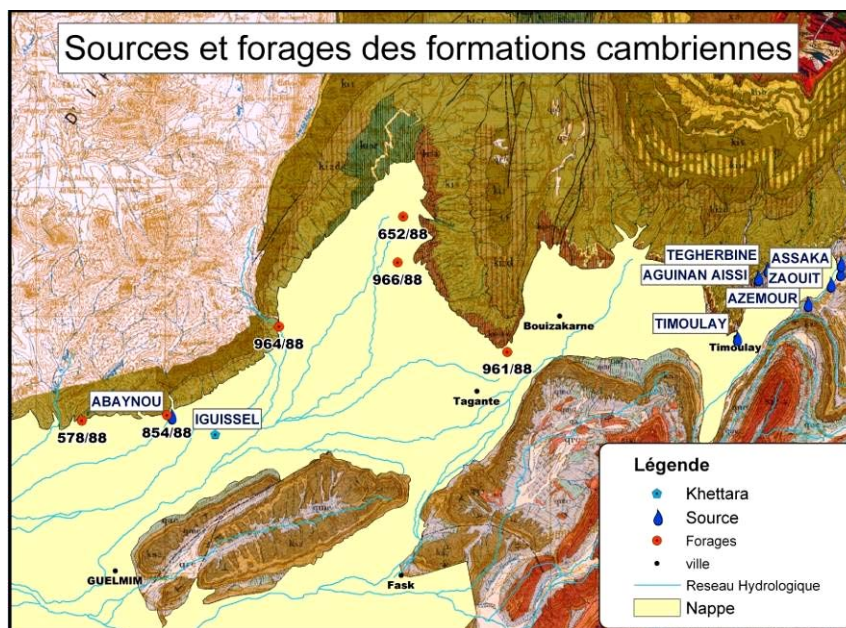


Figure 18 : Situation des forages et sources des formations d'âge Cambrien

Par ailleurs, une importante étude par sismique réflexion haute résolution entreprise en 1997 par la société Géotlas a mis en évidence l'approfondissement des calcaires supérieurs sous le recouvrement d'âge Acadien depuis la bordure Sud de l'anti-atlas (à Abaynou) vers le Sud où ils se situent à plus de 2000 m sous la ville de Guelmim (3.2.4.2c - p.41). En outre, l'analyse du régime de fluctuation des débits des sources de la région de Guelmim montre que les sources peu sensibles aux

variations de précipitations, et donc alimentées à partir de l'aquifère profond, sont celles situées au niveau de la bordure Nord-Est de la plaine. (Voir §3.5.2 p.78).

En conclusion, tous les arguments cités ci-dessus confirment qu'une contribution par abouchement souterrain de la série cambrienne à l'alimentation de la nappe superficielle est limitée aux bordures de la plaine. D'autre part, l'aquifère le plus important de point de vue ressource, accessibilité et disponibilité de données hydrogéologiques est celui des formations d'âge plioquaternaire. C'est donc cet aquifère qui sera étudié plus en détail dans la suite de ce chapitre.

### **3.3.2. ETUDE DE LA NAPPE PLIOQUATERNAIRE**

#### **3.3.2.1 Délimitation de L'aquifère étudié**

L'aquifère plioquaternaire est limité latéralement par l'affleurement de formations d'âge géorgien (calcaires supérieurs et schisto-calcaire) au Nord et au Nord-Est, et par l'affleurement des schistes acadiens au niveau du Jbel Guir et Jbel Taïssa au Sud et à l'Ouest, et par le Jbel Tayert au centre.

Ne seront pas considérées dans cette étude:

- La région Sud-Est reliée à la plaine de l'oued Noun par un large col à ressources limitées ;
- La région Sud-Ouest : « maader Tamberdout » et la plaine de Taïdalt, vu le manque de données hydrogéologiques sur cette région.

Le substratum de la plaine formé essentiellement des schistes d'âge acadien dans la quasi-totalité de la région, de calcaire schisteux dans la zone d'Andja et le long de l'axe Tagant-Bou Izakarn, de roches dolomies sur la bordure Sud de l'anti-atlas et de quartzites localisés sur le Jbel Tayert constitue le mur de cet aquifère.

### **3.3.3. DESCRIPTION DE L'AQUIFERE PLIOQUATERNAIRE**

Les caractéristiques de l'aquifère plioquaternaire de point de vue épaisseur et lithologie sont connues essentiellement à travers les forages et puits exécutés dans la région. Ainsi, nous avons commencé par dresser une carte d'isopaches du Plioquaternaire qui renseigne sur l'épaisseur des formations susceptibles d'emmagasiner l'eau. Par la suite, nous avons déduit l'épaisseur de la zone saturée à partir des deux cartes suivantes:

- La carte du toit des schistes acadiens (Carte 4 p.42) qui correspond aussi au dessin du mur de l'aquifère plioquaternaire
- La carte piézométrique décrite plus loin dans ce chapitre qui renseigne sur le toit de cet aquifère.

Ensuite, en précisant pour tout point d'eau pour lequel une description lithologique est disponible (forages et puits inventoriés par la DRH) les limites verticales de la zone saturée, nous avons pu élaborer une carte des faciès lithologiques des terrains réservoirs de la plaine de Guelmim.

#### **3.3.3.1 Epaisseur et réserves en eau de la nappe Plioquaternaire**

La confrontation de la carte du toit de substratum imperméable avec la topographie du terrain permet d'élaborer la carte d'isopaches du remplissage plioquaternaire (Carte 8). L'examen de cette

carte montre que la puissance des formations plioquaternaires varie entre 10 et 90 m. Les épaisseurs les plus élevées sont rencontrées au Sud de Bou Izakarn et à Tagant, et au Nord-Est de Guelmim et d'Abaynou où un surcreusement des schistes acadiens a été mis en évidence. Par contre, les plus faibles épaisseurs obtenues (Sud de Ksabi et Fask) sont localisées aux endroits de remontée du substratum schisteux. La puissance moyenne de l'aquifère du plioquaternaire est de 31 m (calculée à l'aide de l'outil Spatial Analyst d'ArcGIS®) sur une étendue de 1177 km<sup>2</sup>. Si l'on considère un coefficient d'emmagasinement moyen de 1%, les réserves totales peuvent être estimés à 365 Mm<sup>3</sup>.

### 3.3.3.2 Géométrie de l'aquifère

La superposition de la carte piézométrique avec celle du toit de substratum imperméable a permis d'élaborer la carte des isopaches des zones saturées du plioquaternaire (Carte 9). L'examen de cette carte montre que la puissance de la nappe plioquaternaire augmente du centre de la plaine vers les bordures où on trouve les puissances maximales au Nord-Est de Guelmim, dans la région de Bou Izakarn - Timoulay, sur la bordure Sud au contact de Jbel Tayert. Par contre dans la région d'Andja et dans la vallée de l'oued Seyyad-Ouerguennoun la nappe est contenue soit dans la frange altérée des schistes acadiens soit dans les calcaires cambriens (plioquaternaire sec).

### 3.3.3.3 Lithologie de la nappe plioquaternaire

Les différents termes litho-stratigraphiques du Plioquaternaire détaillées précédemment (p.46) peuvent être éclatés, regroupés et réarrangés en unités plus homogènes, possédant des caractéristiques hydrogéologiques communes (perméabilité, épaisseur), afin de mieux décrire l'aquifère étudiée de point de vue lithologie. En effet, nous pouvons distinguer :

- Les formations très perméables regroupant :
  - Les dépôts les plus récents généralement de faible épaisseur qui associent les faciès sédimentaires de la région (alluvions, galets, produits d'altération ...);
  - Les calcaires, les calcaires marneux et les marno-calcaires qui constituent les principales formations aquifères du bassin de Guelmim;
  - Les sables et alluvions de lits épigéniques.
- Les formations moins perméables que les précédentes à savoir:
  - Les argiles et marnes sableuses qui correspondent à des faciès peu perméables qui s'intercalent entre les couches aquifères.
  - Les conglomérats et les alluvions polygéniques qui résultent de l'altération de roches constituant le socle imperméable.
- Les formations imperméables regroupant :
  - Les limons et croûtes calcaires superficielles qui, à forte puissance, empêchent l'infiltration des eaux de pluies et la recharge de la nappe.
  - Les marnes, les argiles et argiles marneuses supposés imperméables et constituant un frein pour l'écoulement souterrain.

Ainsi, une centaine de forages profonds ont été employés pour l'élaboration de la carte des faciès des zones saturées (Carte 10). De l'examen de cette carte, nous pouvons distinguer 3 secteurs

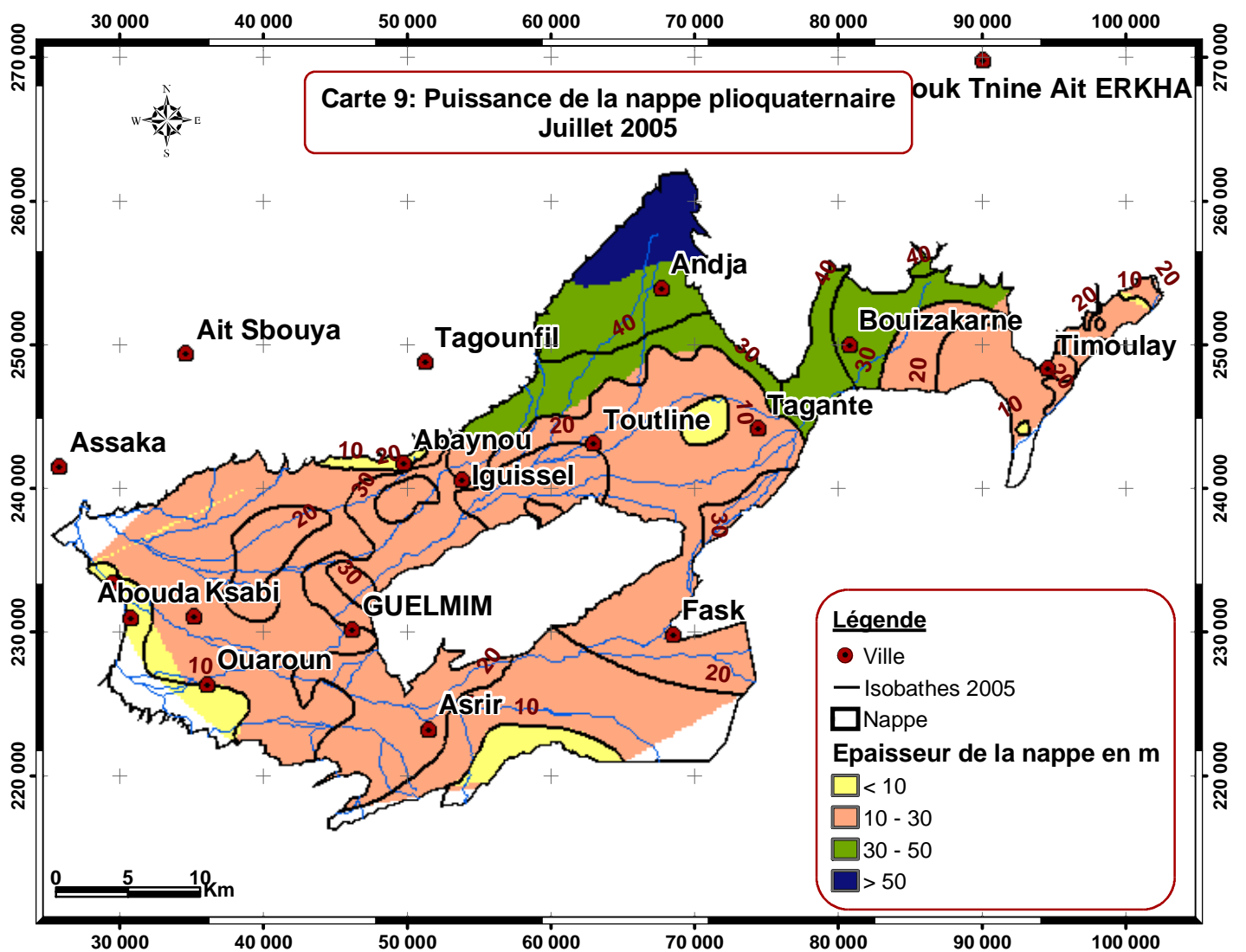
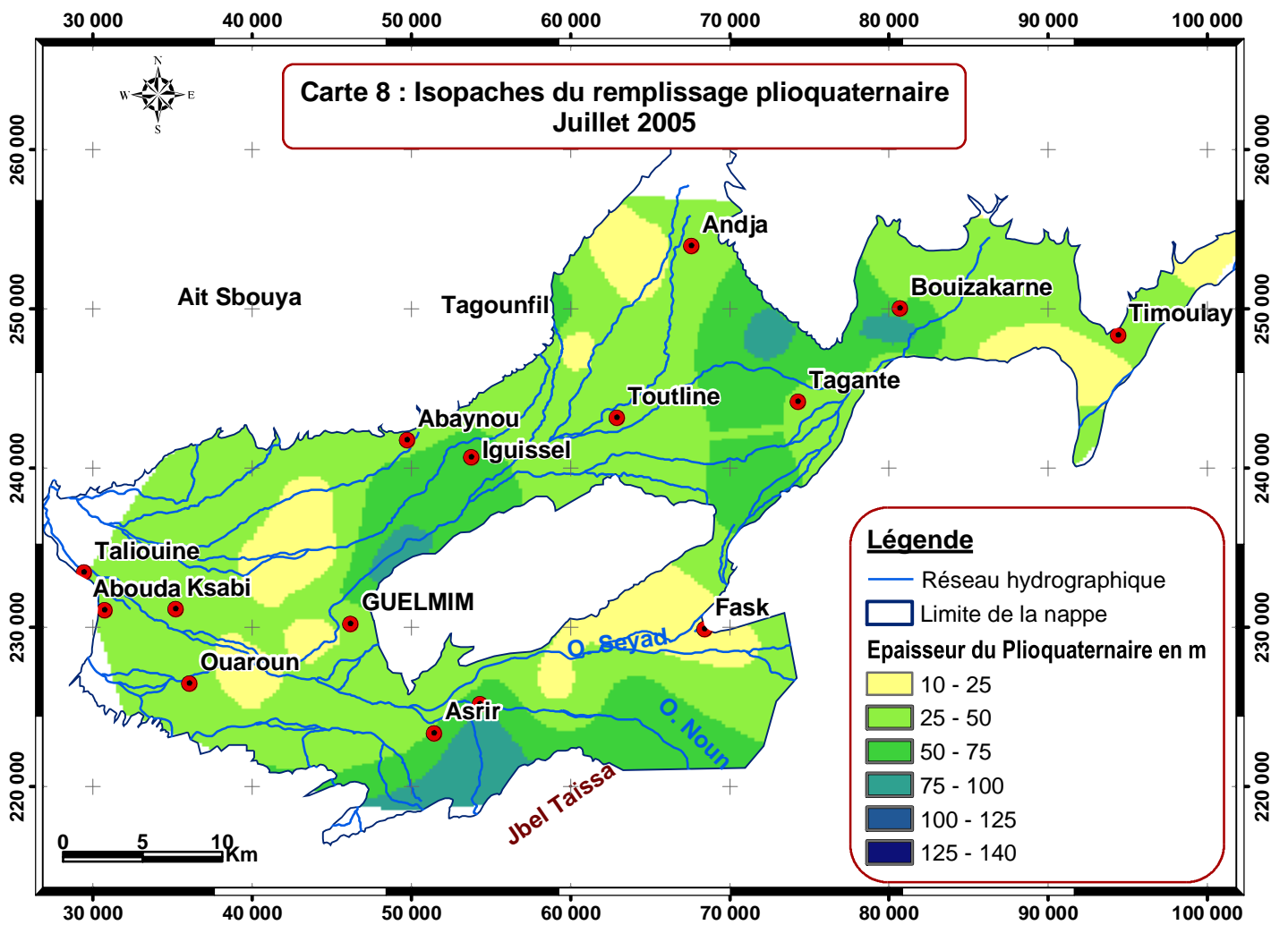
homogènes : les secteurs Nord et N-E de la plaine où la nappe est contenue dans les calcaires lacustres, le secteur N-W où la nappe est contenue dans les calcaires marneux à marno-calcaires, et le secteur sud où la nappe est contenue dans les marnes sableuses. En dessous de ces formations sont rencontrées des lits fossiles, très perméables, qui suivent le même tracé que ceux des oueds Oum Al Achar au N, et Seyyad - Ouerguennoun au S.

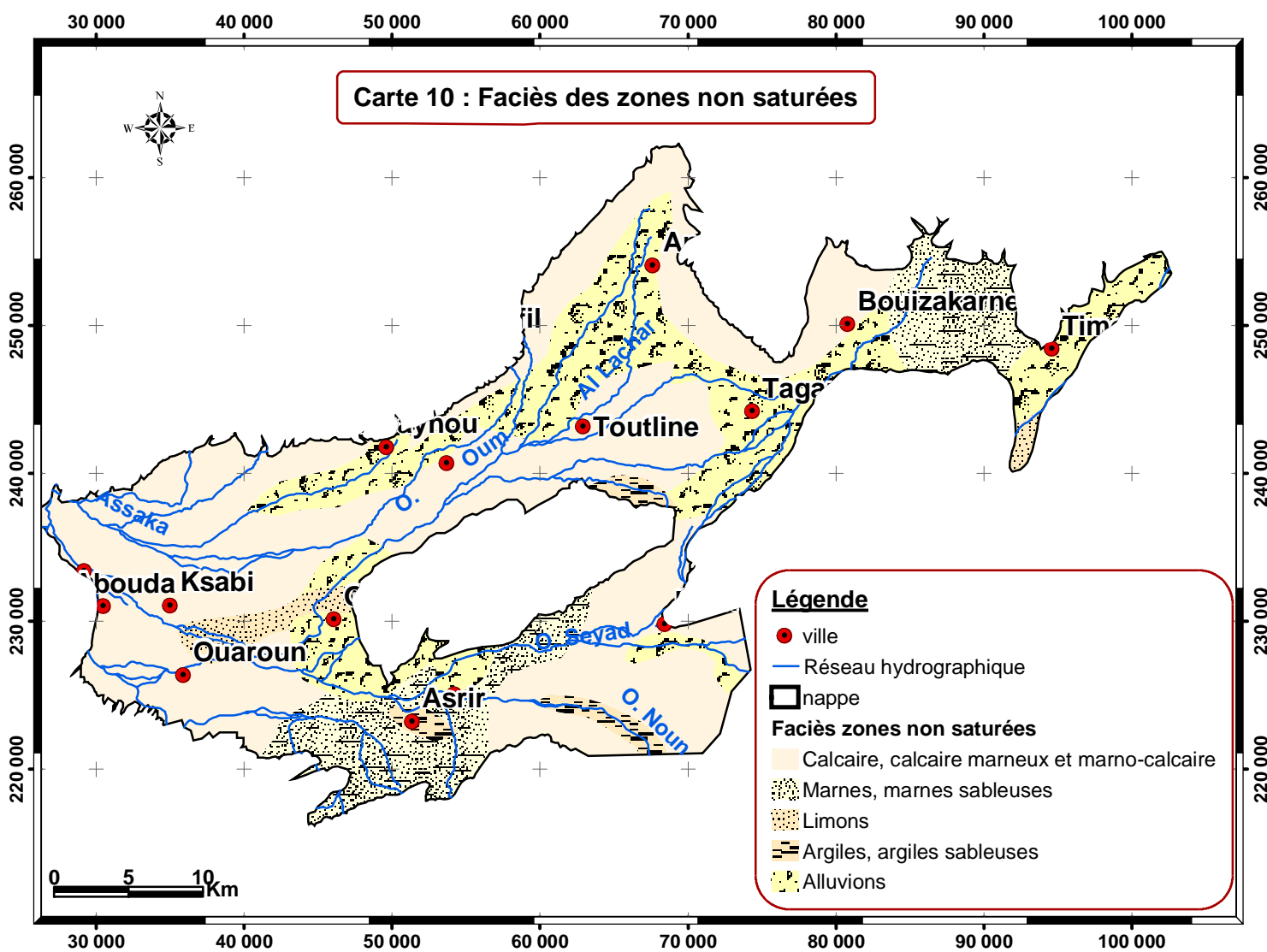
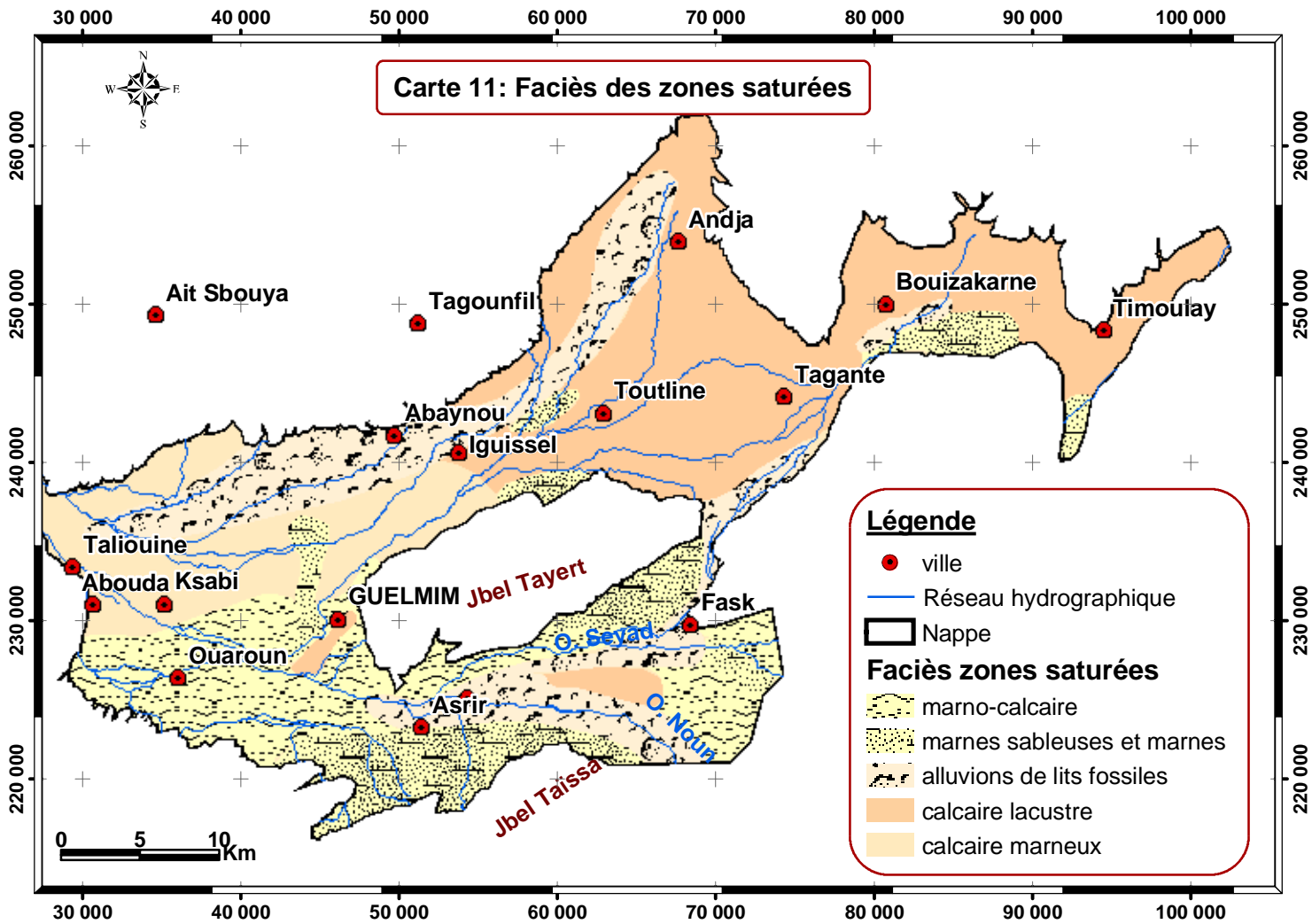
De même une carte des faciès des zones non saturées a été élaborée (Carte 11). Combinée avec la carte de la profondeur de la nappe qui renseigne sur l'épaisseur de la zone non saturée, cette carte permet d'identifier les zones potentielles de recharge de la nappe superficielle.

En effet, des alluvions très perméables sont rencontrées autour de la ville de Guelmim à l'Ouest de Jbel Tayert, au long de l'axe Bou Izakarn – Tagant jusqu'au Nord de Fask, au Nord-Est à Timoulay, et dans la vallée d'Oum Al Achar.

L'épaisseur de ces alluvions dépasse 10 m aux alentours de Guelmim, le long de la bordure Sud de l'Anti-Atlas et de l'oued Oum Al Achar, et atteint 66 m dans le forage 585/88 situé dans le couloir reliant Tagant à Fask. Ces régions correspondent donc à des zones potentielles de recharge de la nappe plioquaternaire.

Par ailleurs, la zone non saturée est contenue dans des les marnes sableuses au Sud, et essentiellement dans des calcaires et calcaires marneux partout ailleurs. Cependant la présence de limons épais de 3 à 6 m sur l'axe reliant Guelmim au sud de Ksabi sur une distance de 11 km, et d'argiles à Asrir et à l'E de Tighmert (le long de Oued Ouerguennoun) témoigne que ces zones sont très peu perméables vis-à-vis de l'infiltration et donc ne sont pas intéressantes pour la recharge de la nappe souterraine.







### 3.3.4. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Guelmim ont été déterminées à partir des données de 47 pompages d'essais réalisés par la DRPE. La carte de localisation de ces points d'essais montre une répartition inégale sur l'étendue de la nappe (Carte 12).

En effet, 17 essais (soit 37%) ont été réalisés autour de la ville de Guelmim contre 10 essais dans la région Nord-Est, 8 dans le bassin de Seyyad-Ouergennoun, 6 dans l'axe Asrir-Ksabi et seulement 2 essais ont été réalisés dans au Nord de la zone d'étude (le premier à Andja et le second à Abaynou). La figure suivante illustre la répartition spatiale de ces essais.

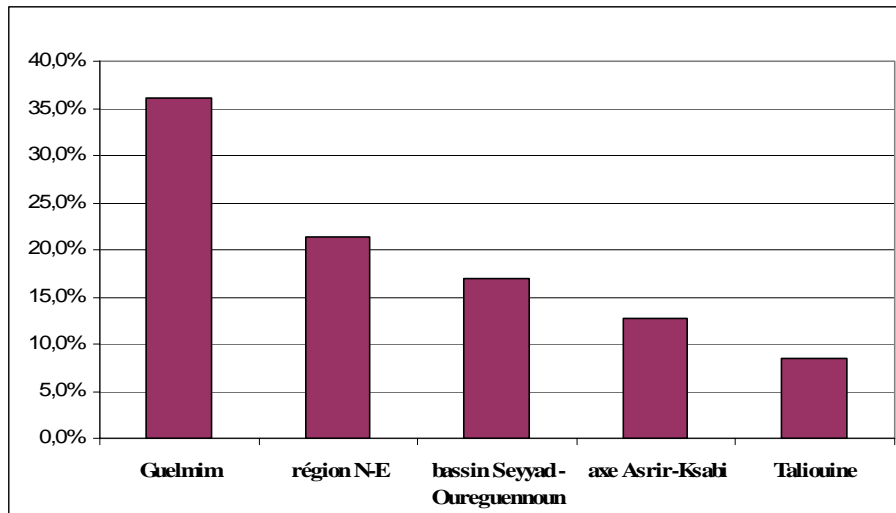


Figure 19 : répartition des essais de pompage réalisés par zones

Le dépouillement des résultats des essais de pompage montre que la durée de ces opérations ne dépasse pas les 24 heures dans 50 % des cas. Les essais effectués ont permis de déduire la transmissivité dans 87 % des cas, alors que la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement n'ont été renseignés que dans 28 % des cas. Sur la base de ces résultats, des cartes de paramètres hydrodynamiques ont été réalisées. Dans ce qui suit nous procéderons à une analyse des grandeurs paramètres hydrodynamiques obtenus et leur répartition spatiale.

#### 3.3.4.1 Transmissivité

Les valeurs de transmissivité varient dans l'ensemble de  $3,1 \cdot 10^{-4}$  à  $3,8 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (Carte 13). 63% des valeurs obtenues sont inférieures à  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, alors que 27% seulement sont supérieures à  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s. La répartition spatiale de la transmissivité montre que les valeurs les plus faibles, généralement inférieures à  $3 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, sont enregistrées au Nord et à l'Ouest de Guelmim, au Nord de Ouaroun et au Sud-Ouest d'Abaynou. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au Sud de Ksabi ( $1,7 \cdot 10^{-2}$  à  $2,23 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) où des traces de lits fossiles ont été mis en évidence au Nord-Est dans les régions de Bou Izakarn et Timoulay, et à Tagant où des valeurs de  $3,3 \cdot 10^{-2}$  et  $3,8 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s ont été obtenues respectivement dans les forages 4/88 et 553/88. Dans le bassin de Seyyad-Ouarguennoun, la transmissivité varie d'Est en Ouest de  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s à  $7 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.



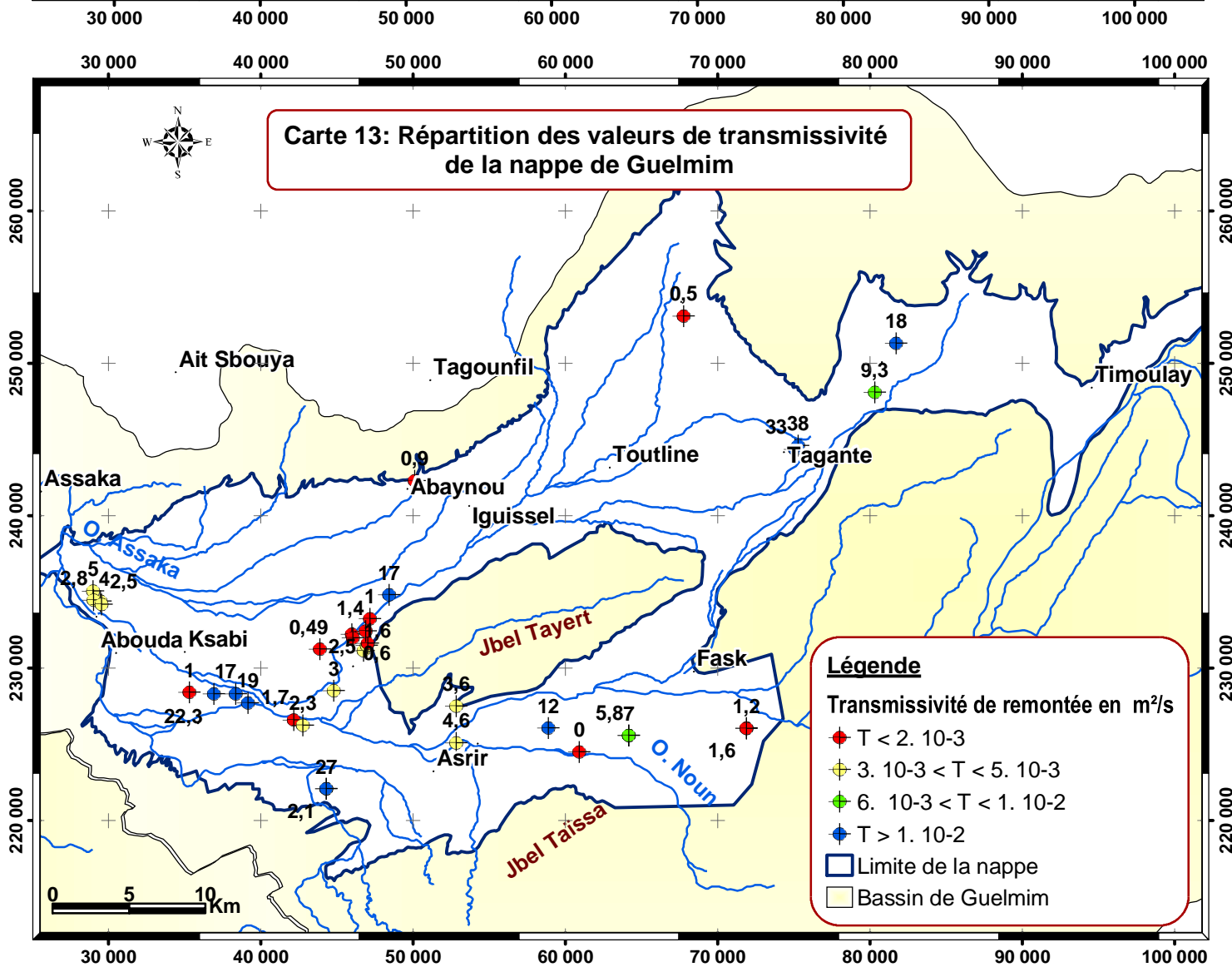
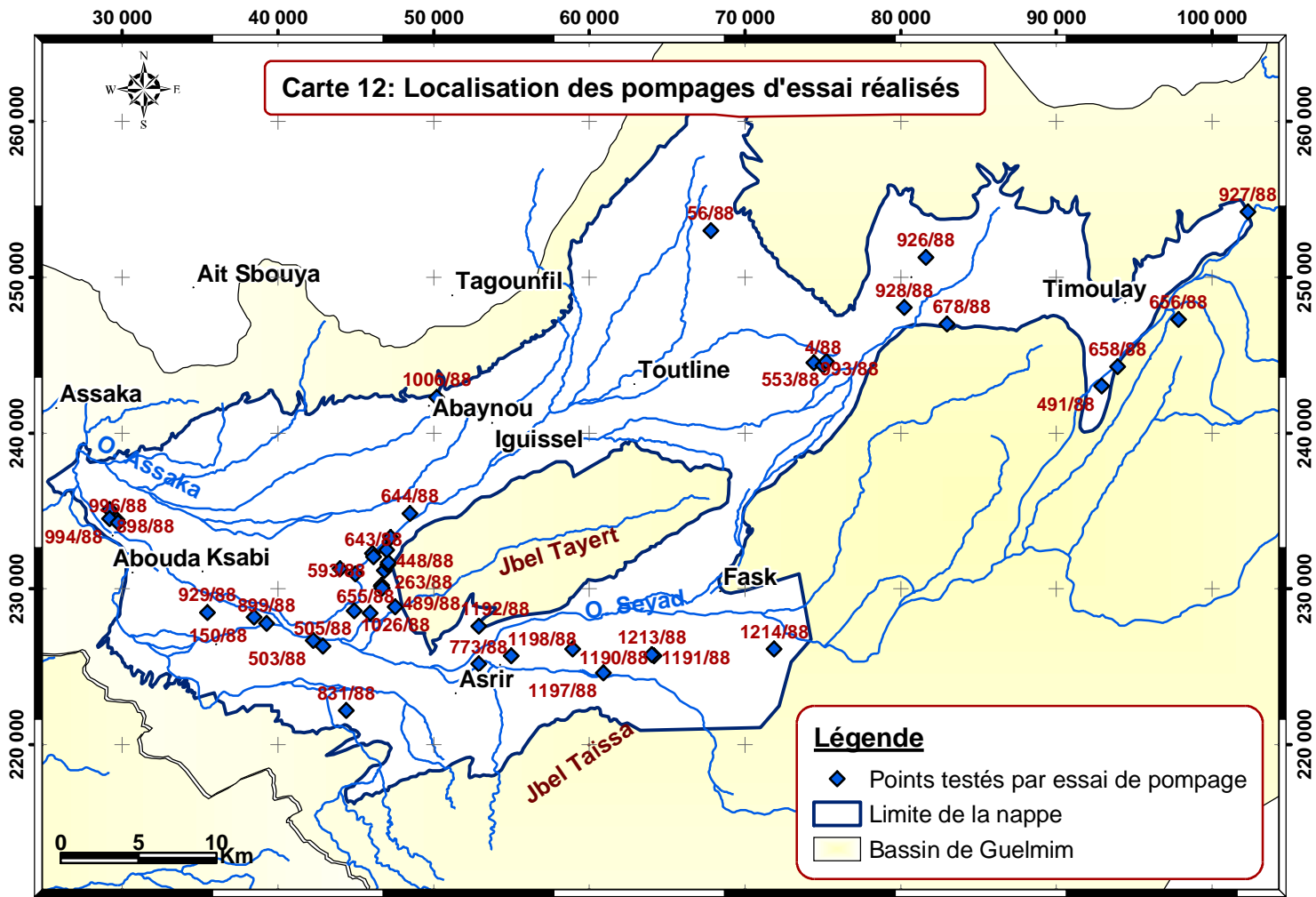
### **3.3.4.2 Perméabilité**

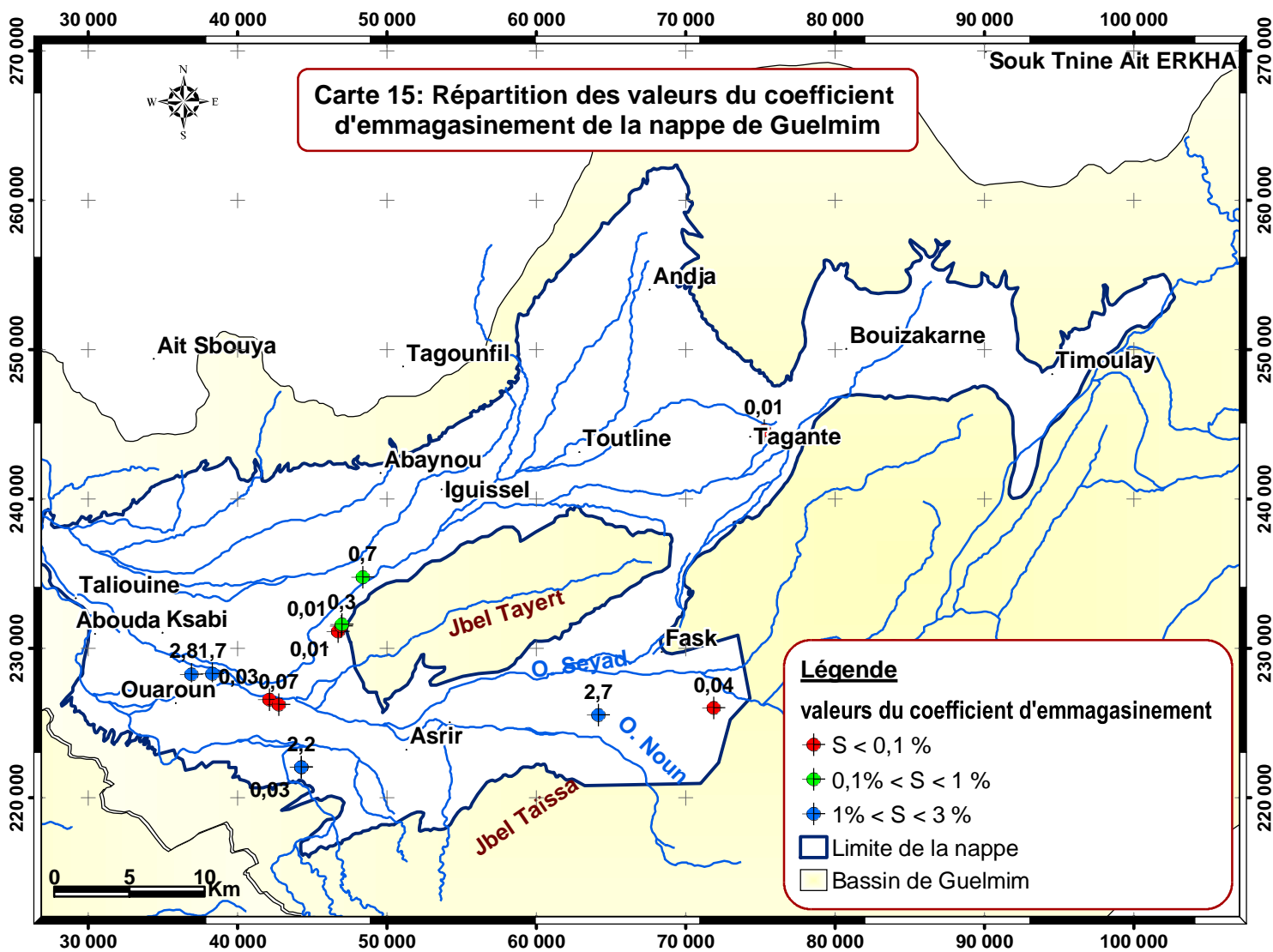
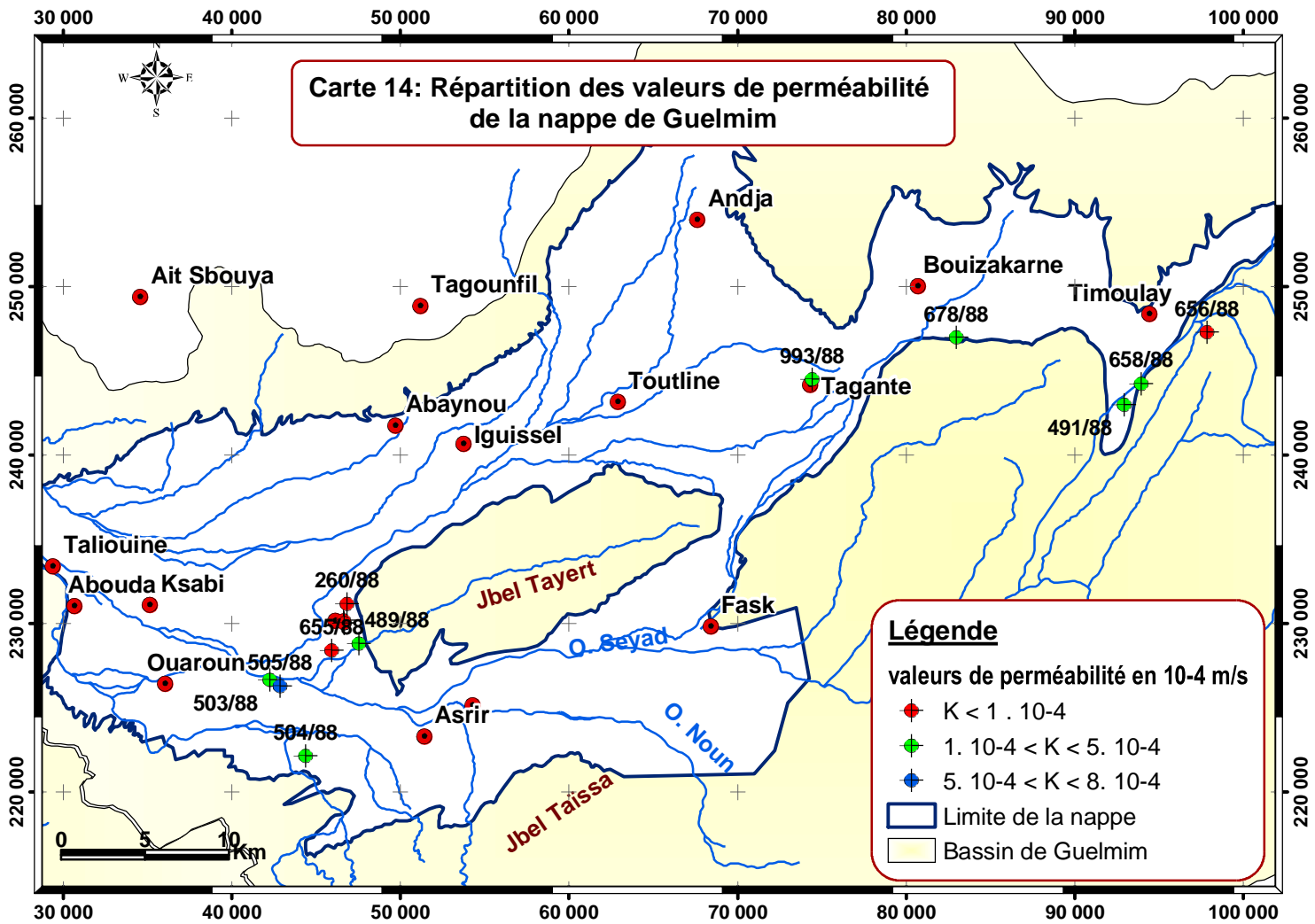
La totalité des valeurs obtenues sont inférieures à  $10^{-3}$  m/s (Carte 14). Elles sont très faibles, inférieures à  $10^{-4}$  m/s dans 28.6% des cas. 22% des valeurs ont dépassé les  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s. La carte de répartition des valeurs de perméabilité montre que 64% des mesures de perméabilité ont concerné les zones entourant la ville de Guelmim, le reste est réparti au Nord-Est de Tagant. Dans la première zone, la perméabilité varie de  $3 \cdot 10^{-5}$  à  $1.83 \cdot 10^{-4}$  m/s. Des maximums de  $4.5$  à  $8.3 \cdot 10^{-4}$  m/s ont été calculés au Sud-Ouest de Guelmim. Au Nord-Est du bassin la perméabilité ne dépasse pas  $1.5 \cdot 10^{-4}$  m/s.

### **3.3.4.3 Coefficient d'emménagement**

Comme pour la perméabilité, la quasi-totalité des mesures du coefficient d'emménagement a concerné les essais effectués autour de la ville de Guelmim et dans le bassin de Seyyad-Ouerguennoun (Carte 15). Les valeurs obtenues sont inférieures à 1% dans 85% des cas.

Le coefficient d'emménagement varie de 0,01 % à 0,7 % à Guelmim. Des valeurs de 1.7 % et 2.8 % ont été mesurés aux forages 126/88 et 150/88 au Sud de Ksabi.

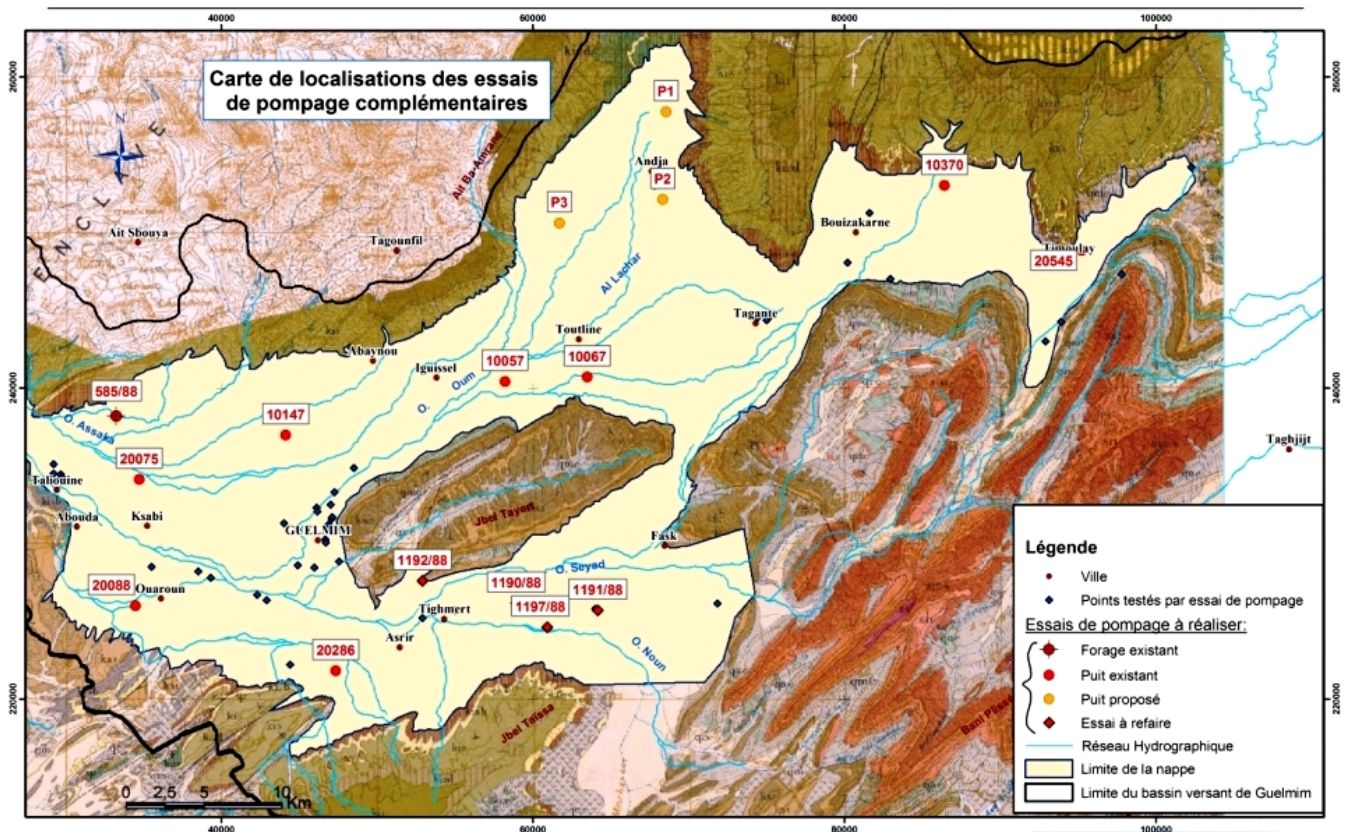




### 3.3.4.4 Critique des données et investigations complémentaires

L'examen des cartes de transmissivité, de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement élaborées dans le cadre de la présente étude, montre une insuffisance des données pour la compréhension du comportement hydrodynamique de la nappe de Guelmim. En effet, à l'exception de la région de Guelmim où un maximum de forages ont été testés, le bassin de Seyyad-Ouarguennoun, les régions de Fask et Bou Izakarn sont très peu renseignés alors qu'au niveau du bassin d'Oum Al Achar et au Nord de Guelmim et de Tissaguenane, aucun essai n'a été effectué. Il est alors indispensable de mener des essais de pompages complémentaires pour une meilleure connaissance de la nappe.

La carte suivante montre les forages ou sites proposés pour la réalisation d'essais complémentaires. Une attention particulière doit être accordée pour les mesures à effectuer au niveau de la bordure Nord, Nord-Est et au Sud d'Abaynou afin de fournir des données fiables pour la détermination des apports par abouchement souterrain et les apports latéraux provenant du plateau des Akhsass qui ont fait l'objet d'estimations très grossières au cours des études antérieures.



Carte 16: Localisation d'essais de pompage complémentaires

### 3.3.5. HYDRODYNAMISME DE LA NAPPE

Lors de l'enquête prélèvements réalisée en Juillet 2005 par la DRPE, des mesures de niveaux piézométriques de la nappe ont été effectuées en vue d'actualiser les connaissances sur la situation piézométrique actuelle de la nappe de Guelmim. Ainsi, sur un total de 1221 points d'eau inventoriés :

- 1201 points soit 98.4% sont renseignés;
- Des mesures de niveau d'eau statique utilisées pour l'actualisation de la carte piézométrique et de profondeur de la nappe ont concerné 971 points soit 81% des points renseignés. Pour le reste les points enquêtés ont été en cours d'exploitation et donc les mesures effectuées sont des mesures de niveaux d'eau dynamiques.

La carte suivante (Carte 17) montre l'implantation des points de prélèvement et les limites des de la nappe. L'examen de cette carte montre une concentration des points enquêtés autour de Guelmim, et au Nord-Est dans la région de Timoulay-Ifrane où des points situées hors de la nappe plioquaternaire ont été recensés, alors que la partie Nord du bassin d'Oum Al Achar, et la zone d'Asrir et de Fask sont très peu renseignée. En outre, en comparant avec les statistiques de l'enquête irrigation de 2001, des différences importantes sont constatées sur les communes Asrir, Guelmim et Ksabi ce qui laisse supposer que l'enquête de 2005 n'a pas été exhaustive dans certaines zones.

#### 3.3.5.1 Profondeur de la nappe

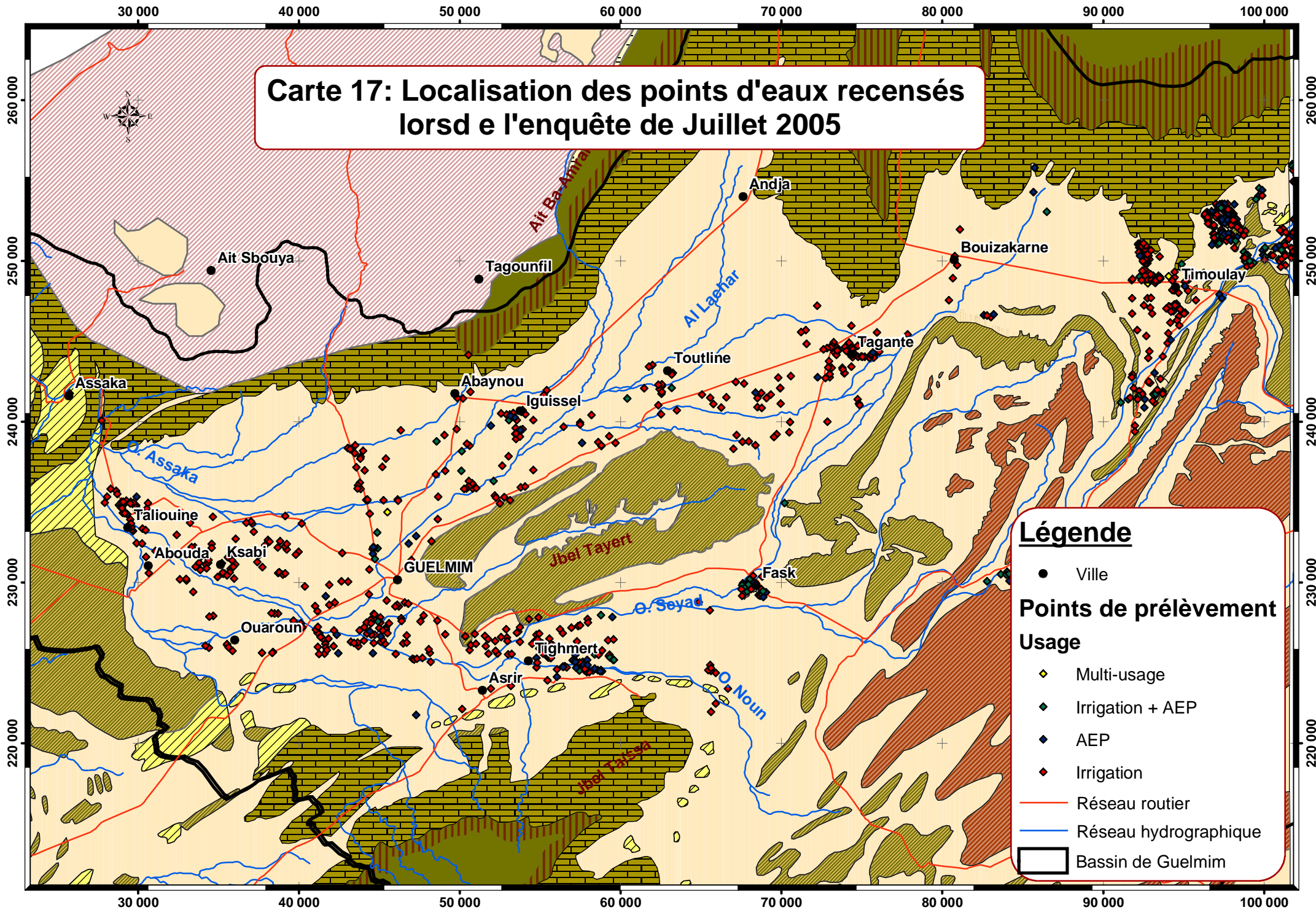
Les mesures du niveau d'eau statique lors de l'enquête de prélèvements 2005 ont servi pour l'élaboration de la carte des profondeurs de la nappe qui renseigne sur l'épaisseur de la tranche non saturée de l'aquifère (Carte 18). Cette carte montre que:

- La profondeur varie de 0.5 m à 65 m avec une valeur moyenne de 20 m.
- Les valeurs les plus faibles, inférieurs à 10 m, sont observées à l'Ouest de la plaine,
- Les profondeurs supérieures à 30 m sont rencontrées au Nord et au Nord-Est de la plaine dans la région de Bou Izakarn où on se rapproche des reliefs calcaires.

Cependant, les cartes élaborées lors des études antérieures ont fait ressortir une zone où la nappe est très proche de la surface du sol et soumise à l'évaporation dans le secteur de Ksabi-Asrir-Ouraoun ce qui n'est pas mis en évidence par la carte actuelle. Ce constat laisse supposer que les régions de Ksabi et Asrir n'ont pas été enquêtées d'une manière exhaustive. C'est ainsi qu'une campagne de mesures piézométriques complémentaires a été proposée à la DGH pour le compte de l'étude réalisé par ADI (Carte 22).



**Carte 17: Localisation des points d'eaux recensés lors de l'enquête de Juillet 2005**



### 3.3.5.2 Piézométrie de la nappe

#### a - Analyse des cartes piézométriques

La piézométrie de la nappe de Guelmim fut établie en mai 1976, octobre 1984, et en mai 1989 sur la base d'enquêtes de prélèvement, et dans le cadre du plan directeur de 1996 à partir des résultats de la modélisation hydrodynamique.

Dans la présente étude, une carte piézométrique a été élaborée sur la base des mesures effectuées lors de l'enquête prélèvements de Juillet 2005 (Carte 20). L'examen de cette carte montre que les niveaux piézométriques obtenues varient entre les cotes 200 en aval de Taliouine et 820 m en amont de Bou Izakarn. Les valeurs les plus élevées sont rencontrées au Nord et au Nord-Est de la plaine puis diminuent en direction de l'Ouest.

La direction d'écoulement est NE-SW entre Tagant et Guelmim et E-W entre Fask et Ouaroun. Ces deux principaux axes de drainage mis en évidence, coïncident avec le tracé de l'oued Oum Al Achar dans la moitié Nord de la plaine et avec celui de l'Oued Seyyad dans la partie Sud. D'Asrir à ksabi, l'axe de drainage coïncide avec le lit fossile de l'oued mis en évidence par les sondages mécaniques. Au niveau de Tagant, une partie des écoulements rejoint ceux des vallées des oueds Seyyad et Noun par l'intermédiaire du « Fom » de Guelmim qui est créé par les collines quartzitiques et par le Jbel Tayert. L'autre partie des écoulements empreint le pied des reliefs anti-atlasiques en direction de Taliouine.

Outre la carte élaborée dans la présente étude, toutes les autres cartes piézométriques établies lors des études antérieures montrent l'existence d'une zone d'alimentation de la nappe par les calcaires géorgiens qui affleurent au Nord-Est au niveau de la plaine de Bou Izakarn et par abouchement souterrain au Nord dans la région d'Abaynou. De même deux axes de drainage ont été mis en évidence. Le premier relie Andja et Tagant à Iguissel en passant par Toutline et le second relie Fask à Ouaroun en passant par Asrir.

#### b - Gradient hydraulique

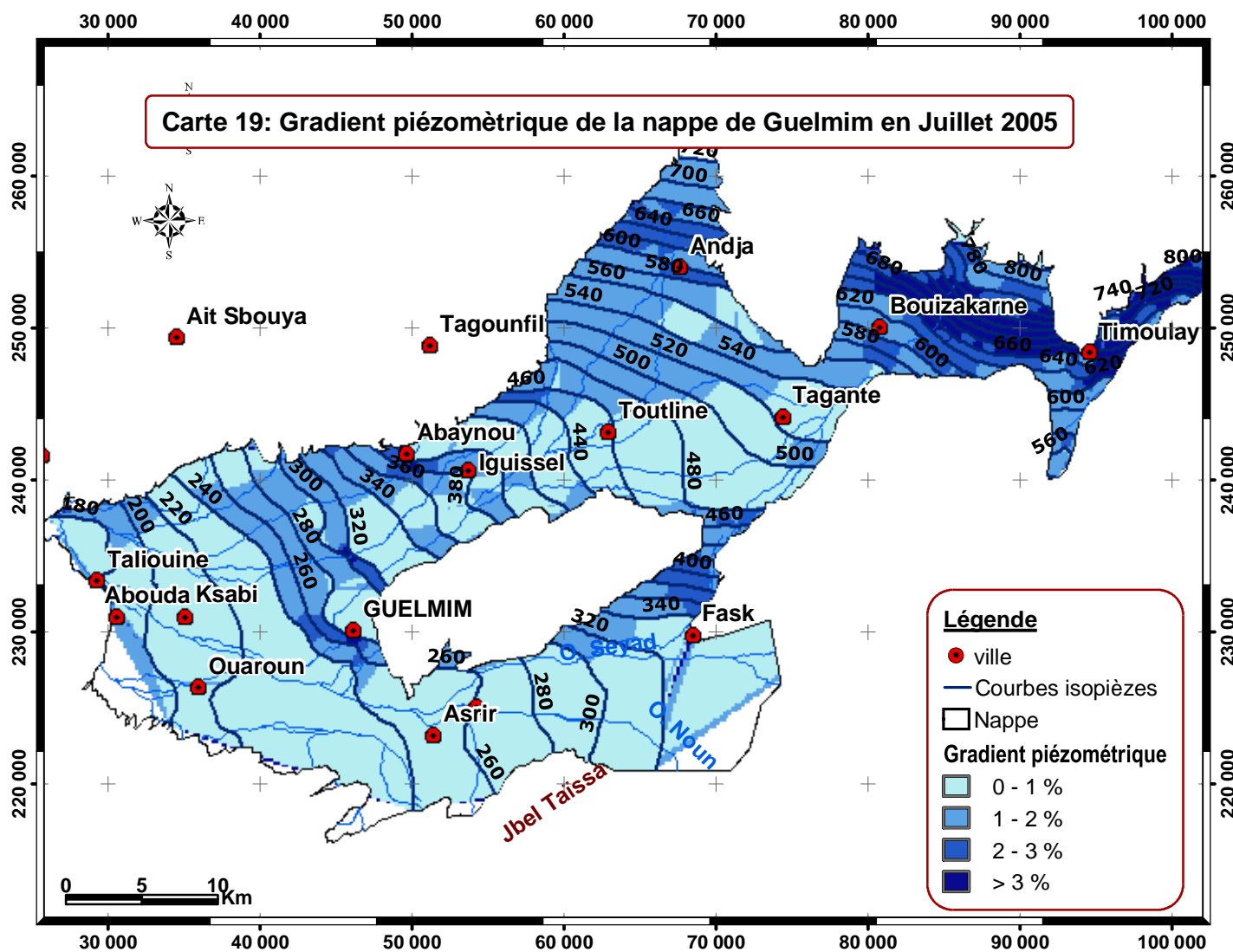
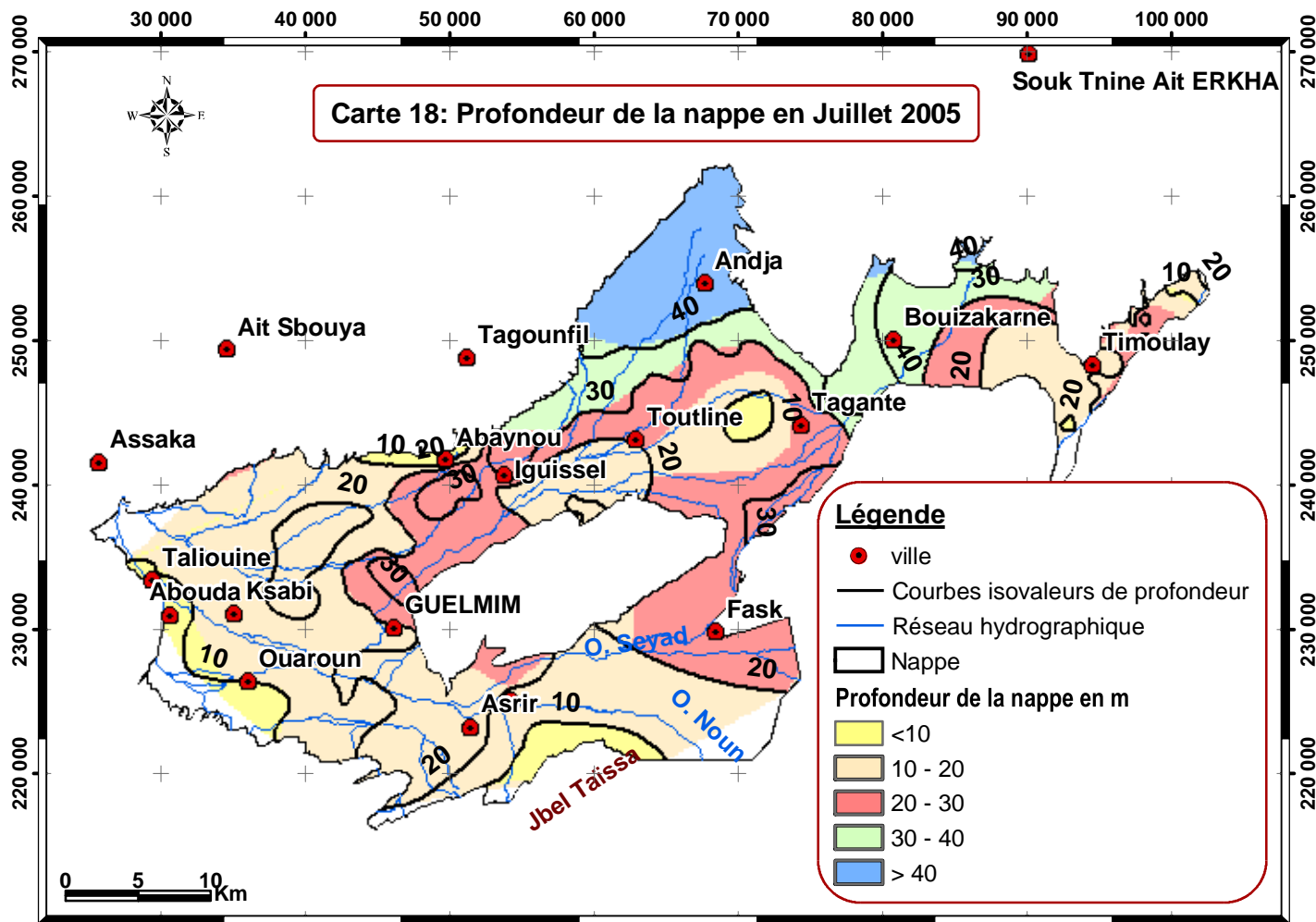
Le gradient hydraulique est généralement inférieur à 3% (2% en moyenne) et atteint des valeurs supérieurs à 4% dans des zones très localisées au Nord-Est de la plaine. Ceci peut être expliquée par l'éloignement des courbes isopièzes dans l'axe reliant Tagant à Iguissel au Nord et dans le bassin de Seyyad-Noun au Sud et au Sud-Ouest. En effet, ces régions sont très exploitées par pompage agricole. La carte suivante illustre la répartition spatiale des différentes classes du gradient hydraulique (Carte 19).

### 3.3.5.3 Fluctuation de la surface piézométrique de nappe

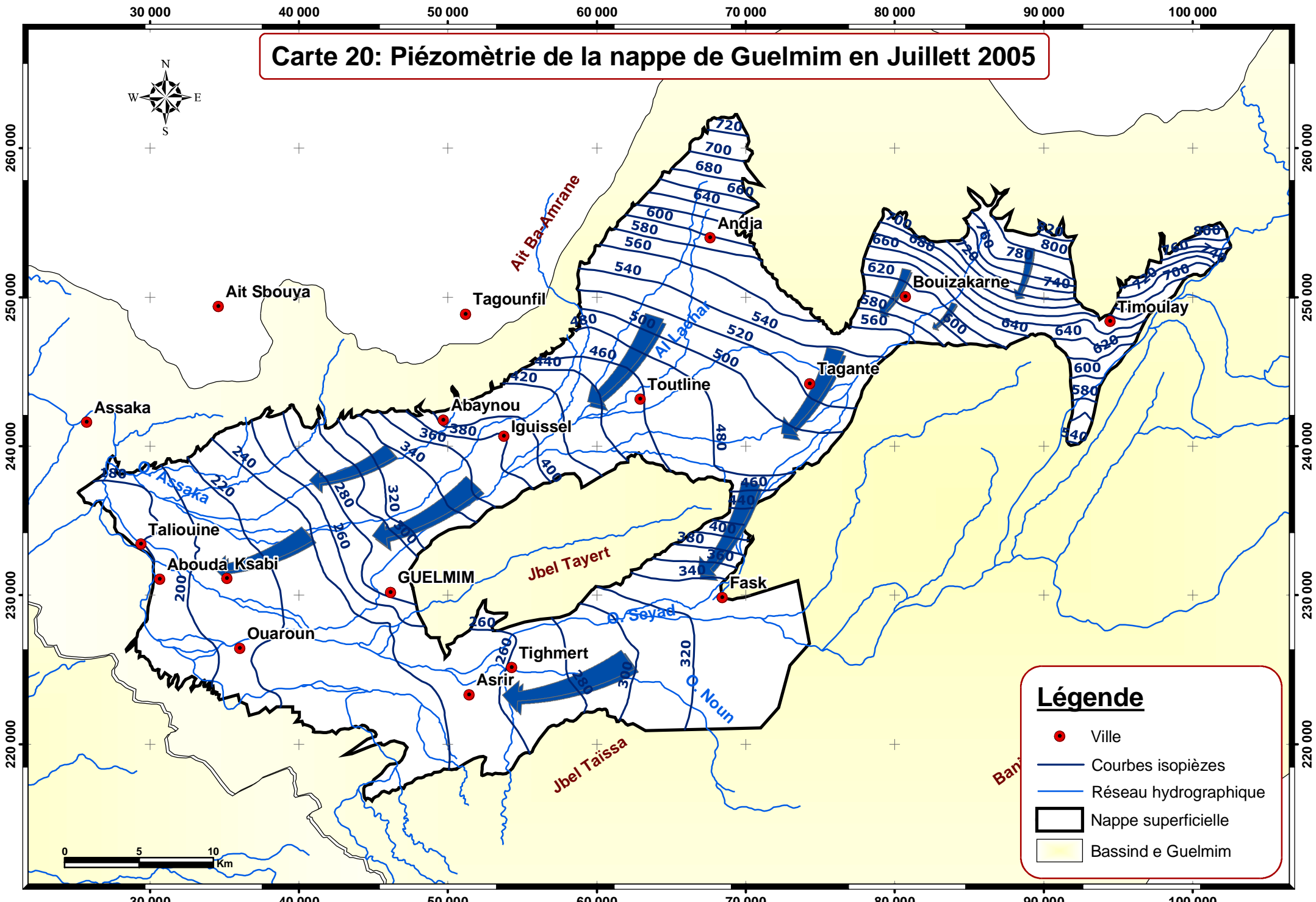
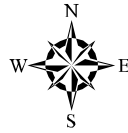
Dans la plaine de Guelmim, un réseau de suivi périodique de la piézométrie fut établi en 1986 pour une vingtaine d'ouvrages dont 18 restent actuellement en service. La carte suivante montre la répartition spatiale des points de suivi de la piézométrie fonctionnels (Carte 21).

L'examen de cette carte montre une insuffisance des points de suivi piézométrique au niveau des régions les plus exploitées notamment au Sud-Ouest dans les régions de Guelmim-Ksabi-Asrir, au N-E à Bou Izakarn et au Sud de Fask.



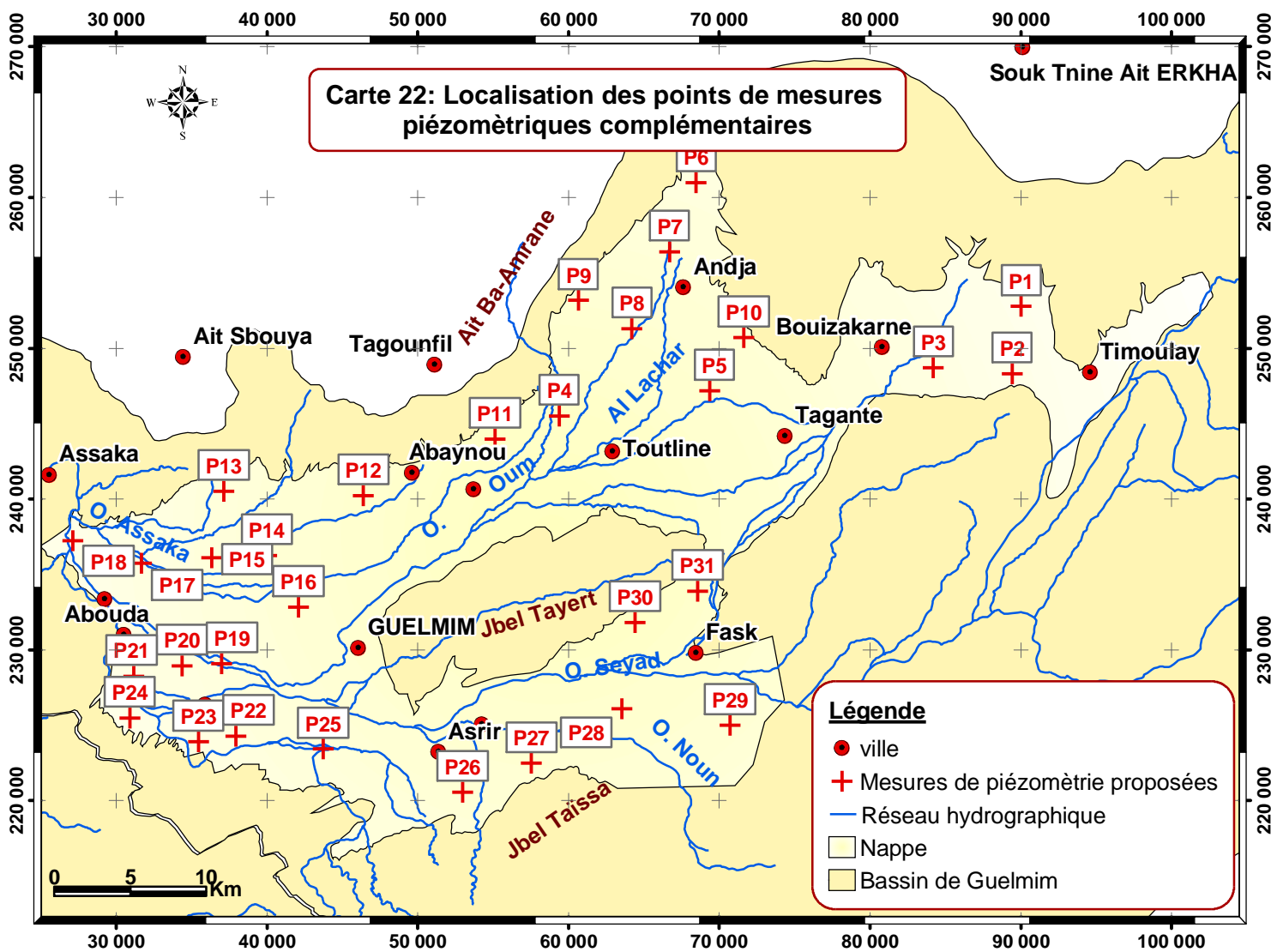
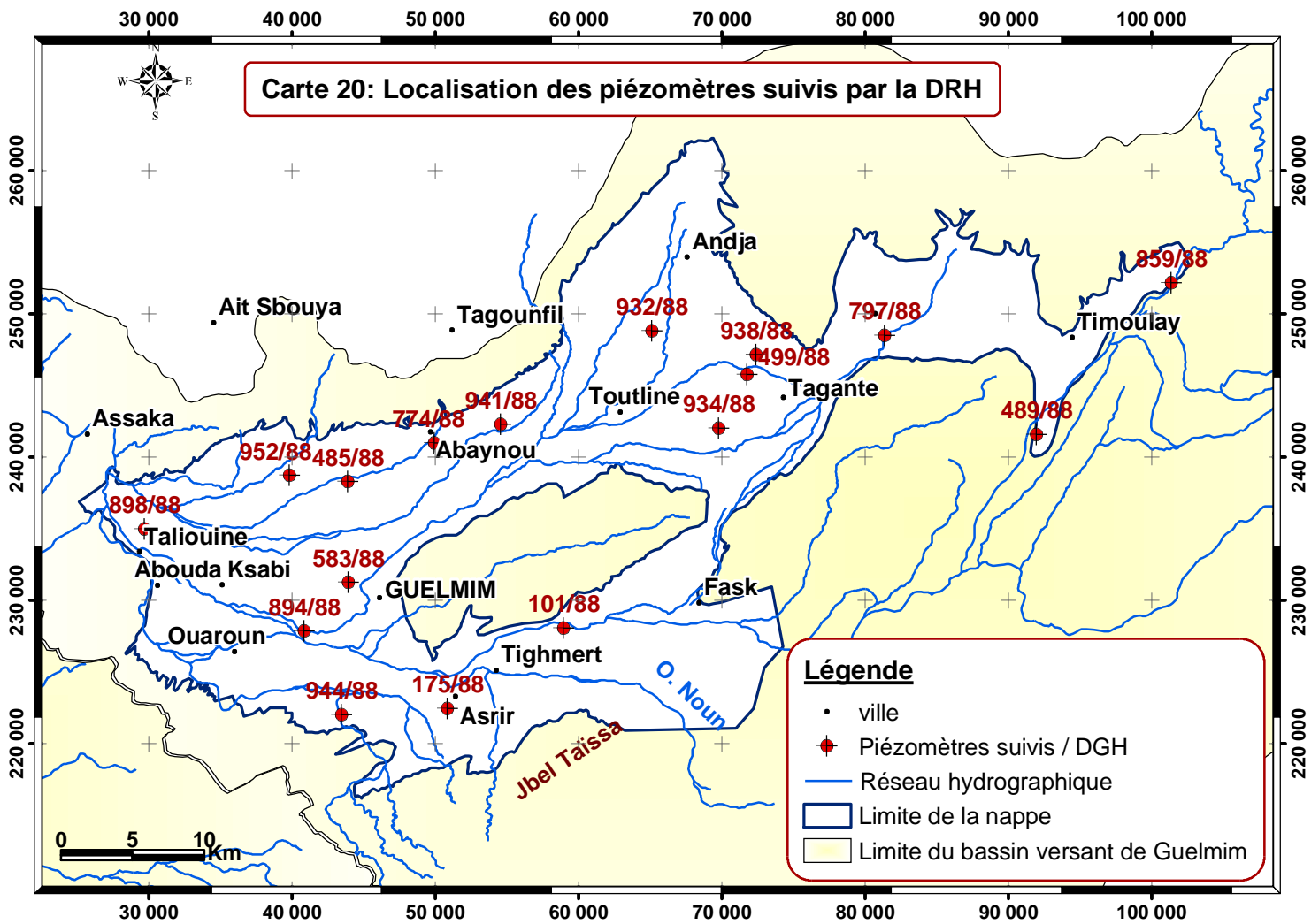


**Carte 20: Piézométrie de la nappe de Guelmim en Juillet 2005**



**Légende**

- Ville
- Courbes isopièzes
- Réseau hydrographique
- ▭ Nappe superficielle
- ▭ Bassin de Guelmim



Pour caractériser le régime de fluctuation de la surface piézométrique de la nappe de Guelmim, des historiques piézométriques allant de 1985 à 2005 ont été constitués à partir des relevés mensuels du niveau piézométrique effectués par la DGH. A titre indicatif, une confrontation du niveau piézométrique avec la pluviométrie mensuelle a été effectuée pour 5 piézomètres les plus représentatifs et qui sont répartis sur les différents secteurs de la nappe. L'analyse des graphes d'historiques piézométriques élaborés permet de tirer les conclusions suivantes :

Dans la vallée de l'oued Seyyad et entre Fask et Guelmim, tous les piézomètres réagissent de la même manière. En effet, l'analyse du régime des fluctuations de la nappe montre que partout dans la plaine, les années 87/88 et 96/97 ont enregistré de fortes remontées de la nappe. Cette remontée maximale, même si l'exploitation des ressources souterraines n'a pas cessé d'augmenter, est due à l'abondance des pluies par rapport aux années précédentes d'une part. Cependant, pour les dix dernières années, le niveau de la nappe a fortement baissé de -0,83 m/an dans la vallée de l'oued Noun (IRE 175/88), -1,5 m/an à Taliouine (IRE 898/88), et de -0,5 m/an à jusqu'à -2,2 m/an dans la région de Guelmim (IRE 583/88 et 894/88).

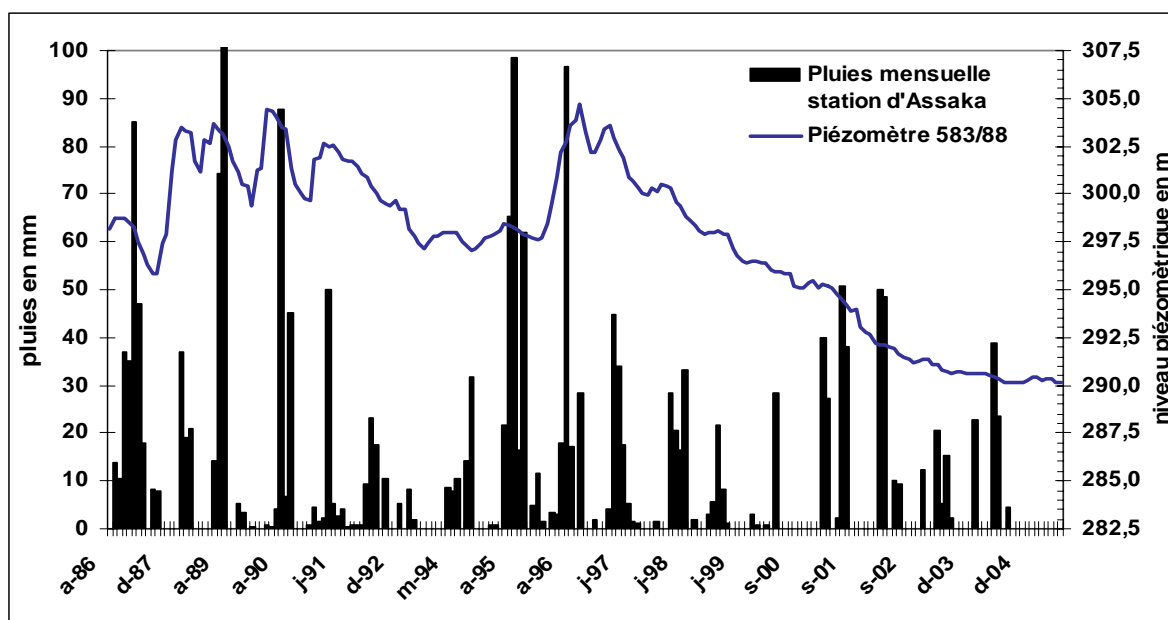


Figure 20 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Guelmim au centre de la nappe

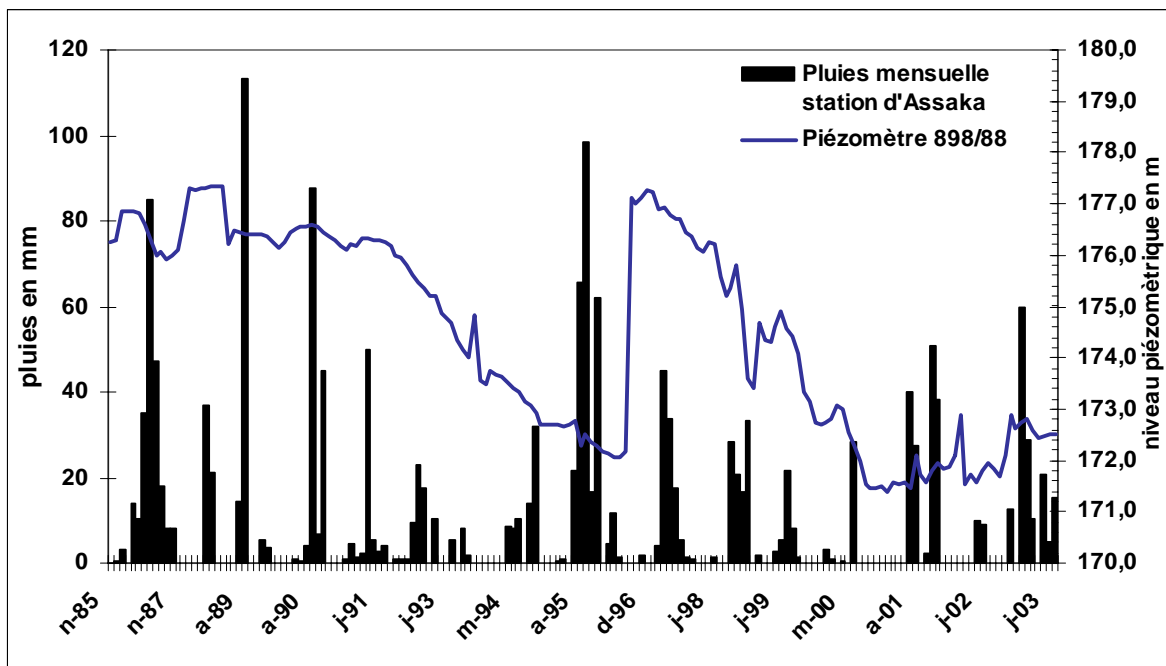


Figure 21 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Taliouine au Sud-Ouest de la nappe

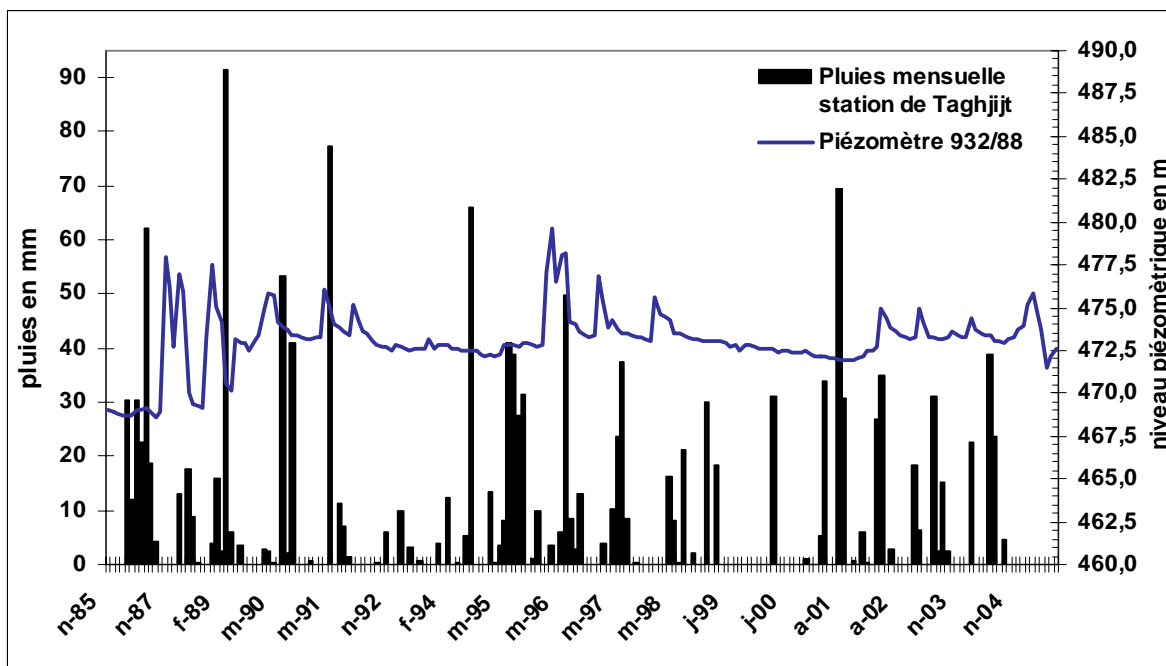


Figure 22 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Toutline dans la partie centrale au Nord de la nappe

Au niveau de la bordure Nord-Oest de la plaine (de Andja à Iguissel) et au sud de l’Anti-Atlas (région d’Abaynou), les piézomètres montrent une stabilisation des niveaux ou même une tendance générale à la remontée du niveau piézométrique (IRE 797/88 et 774/88) ce qui peut s’expliquer par un abouchement probable de la nappe plioquaternaire avec celle des calcaires du Cambrien.

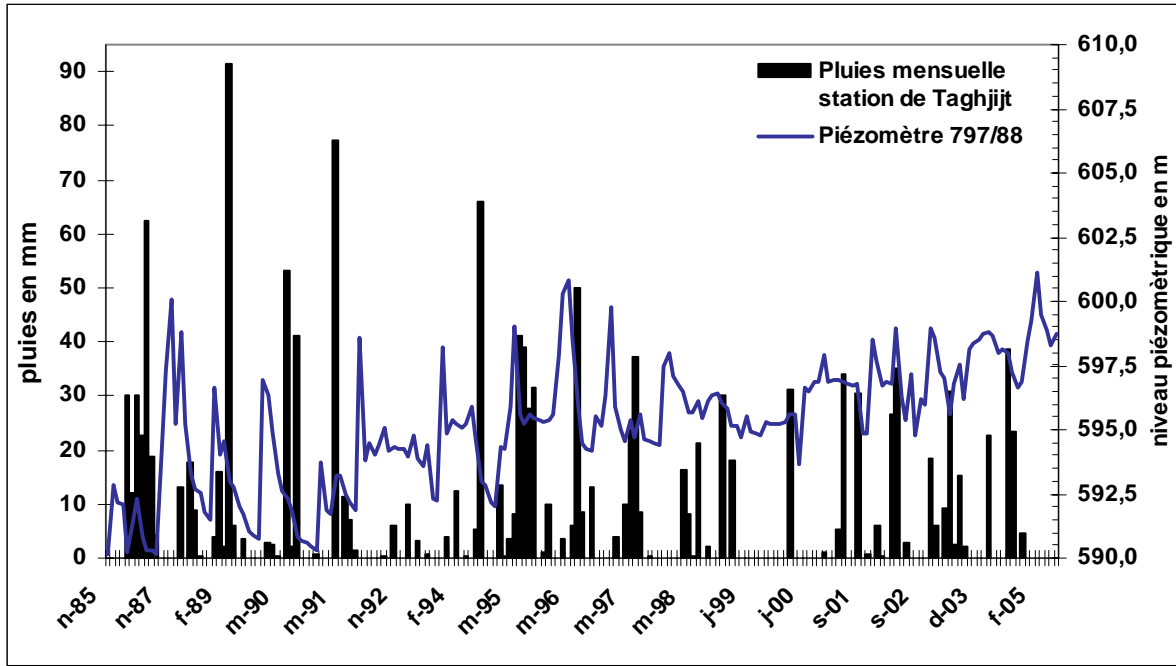


Figure 23 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région de Bou Izakarn au Nord-Est de la nappe

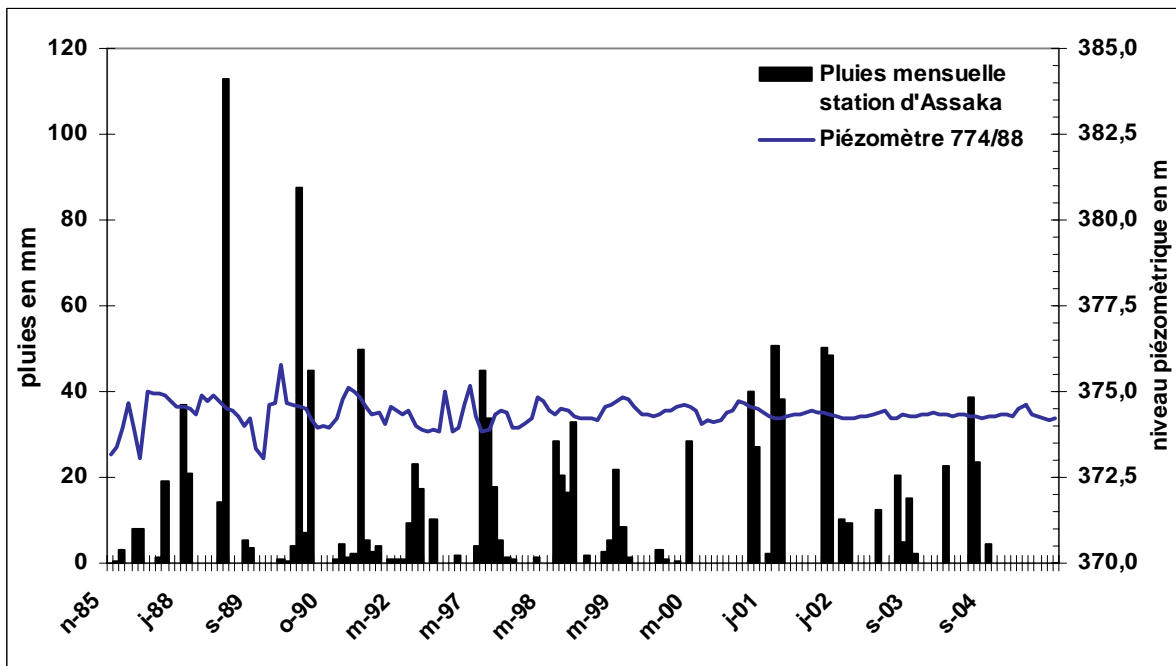


Figure 24 : Fluctuation de la surface piézométrique : Région d'Abaynou au niveau de la limite Nord de la nappe

### **3.4. ETUDE SPECIFIQUE DE LA RECHARGE**

#### **3.4.1. IDENTIFICATION DES MODALITES DE RECHARGE DE LA NAPPE PLIOQUATERNAIRE**

L'ensemble des connaissances géologiques et géophysiques sur le bassin de Guelmim a permis de dégager des conclusions quant aux modes de recharge de la nappe plioquaternaire. En effet, les coupes géologiques établies montrent que sur le pourtour des plaines de Bou Izakarn - Goulimine, les formations calcaires du Nord, perméables en grande partie, s'enfoncent sous les plaines où elles sont couvertes par d'épaisses formations schisteuses imperméables, et qu'un abouchement de ces nappes profondes avec les formations plioquaternaires de la plaine ne s'effectue qu'au niveau de la bordure Nord à Abaynou et Nord-Est.

En outre, les formations schisteuses affleurant à l'Est et plongeant sous la plaine constituent des limites imperméables à toute alimentation souterraine de l'aquifère superficiel à partir du Bani.

Outre ces conclusions issues de la géologie et la géophysique, nous allons dans ce qui suit exploiter les résultats des études isotopiques, géochimiques, et de télédétection entrepris dans la région par la DRPE pour son analyse hydrogéologique.

##### **3.4.1.1 Apports des études isotopiques**

Dans le cadre d'un projet de collaboration entre la DRPE et l'AIEA, trois campagnes d'analyses isotopiques ont été effectuées en juin-octobre 95 et mai 96. L'analyse Tritium-C14 a abouti aux résultats suivants (Wardi, 1999) :

- Origine profonde de la source d'Abaynou et son alimentation à partir des terrains adoudouniens affleurant à travers des failles et l'épaisse série de calcaires géorgiens. Ces origines sont prouvées par l'absence de nitrates et le minimum de Tritium et de C14 enregistrés ;
- Mélange à l'entrée de Bou Izakarn d'eaux anciennes du Cambrien du plateau des Akhssas et d'eaux récentes infiltrées dans le quaternaire.

Le traçage naturel des eaux au moyen des isotopes de la molécule d'eau ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) a permis de déduire :

- Une alimentation diffuse dans le bassin d'Oum Al Achar, et effet d'évaporation presque nul.
- Une recharge au niveau de l'Oued Seyyad par les eaux de pluie et par les épandages des eaux de crue provenant du N-E et de l'Est du bassin. Ce résultat a été confirmé aussi par la faible part d'eaux d'origine profonde.

##### **3.4.1.2 Apport des études de modélisation géochimique**

Dans ce paragraphe, nous exposerons les principales conclusions de l'application d'un modèle géochimique et isotopique (NETPATH) (Aiachi in Lyazidi, 2001) à un ensemble de points échantillonnés le long des différents profils du système hydrologique du bassin de Guelmim. Cette étude a permis :



- De confirmer une circulation des eaux du Nord vers le Sud dans le bassin d'Oum Al Achar, de ce dernier vers le bassin Seyyad à travers le couloir entre Jbel Tayert et les reliefs du Bani à l'Est et de l'Est du bassin vers l'Ouest en suivant le tracé des Oueds Seyyad – Oum Al Achar.
- De mettre en évidence l'évaporation très intense dans la partie avale du bassin Seyyad.

En outre, l'application d'un modèle d'écoulement en hydrologie isotopique (modèle exponentiel (EM) et de dispersion (DM)) a fourni des informations très intéressantes concernant le taux de résidence moyen qui est de l'ordre de 160 +/- 12 ans pour le bassin Seyyad et 260 +/- 30 ans pour le bassin d'Oum Al Achar, et la vitesse de recharge moyenne estimée à 4,62 +/- 0,6 mm/ans pour le premier bassin et 7,41 +/- 0,59 mm/ans pour le second.

Ces résultats viennent appuyer l'hypothèse d'une origine récente des eaux des deux bassins de la plaine de Guelmim. Ces eaux semblent être le résultat d'une succession de recharges actuelles ce qui confère aux réserves de cette région leur caractère de renouvellement par les apports de précipitation et d'épandage de crue.

### 3.4.1.3 Apport de l'étude de télédétection appliquée à l'hydrogéologie

Une étude pilote par télédétection spatiale portant sur la possibilité d'exploration des aquifères profonds de la région de Guelmim a été réalisée dans le cadre d'une convention entre la DRPE, le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS) et Spot Image en 2000. Cette étude a permis de dégager les conclusions suivantes :

- Existence d'escarpements de failles d'origine tectonique apparaissant par endroits et sont souvent masqués par des cônes de déjection et des glacis d'érosion. En effet, l'analyse structurale de la zone d'étude sur les scènes SPOT et ERS a fait ressortir les accidents tectoniques ayant affecté la série calcaire au contact du massif d'Ifni et au sud de la plaine (figure ci-dessous). En outre la présence de dépôts de travertins sur la bordure Nord témoigne de l'existence de sources dont certaines montrent des traces d'activité hydrothermale en relation directe avec les failles bordant le synclinal comme c'est le cas de la source d'Abaynou.

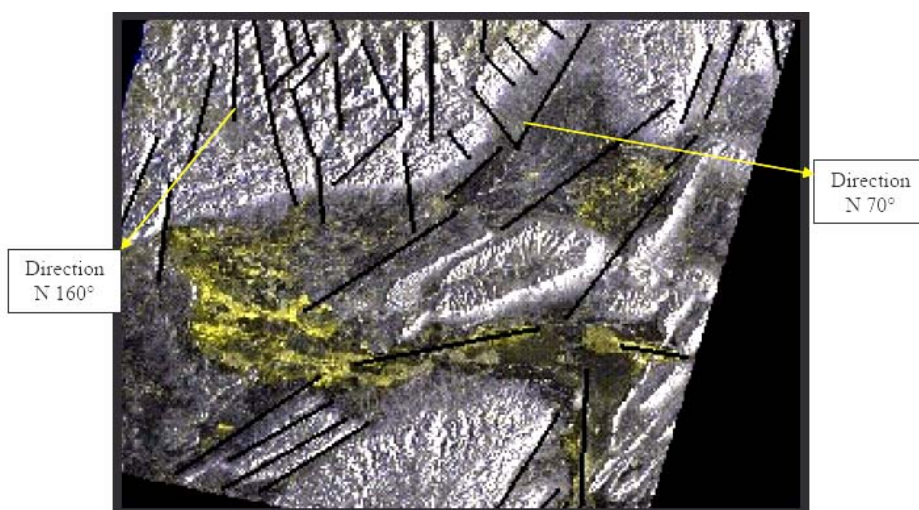


Figure 25: identification des failles jouant un rôle actif pour l'alimentation des nappes profondes de la plaine de Guelmim

- une très nette aptitude à l'infiltration des principaux exutoires du drainage superficiel du massif d'Ifni mise en évidence lors de l'interprétation des images radars, due essentiellement à l'existence d'un système de fracturation très intense au droit de l'escarpement nord de la plaine. Ces fractures jouent le rôle de recharge à la fois de l'aquifère superficiel de la nappe plioquaternaire et des aquifères profonds qui plongent dans la plaine au nord comme au sud.
- une probabilité d'écoulement d'eau douce en mer en se référant aux observations l'activité tectonique affectant l'ensemble du massif d'Ifni. Si Cette hypothèse est confirmée la direction SE-NW constituera l'axe de drainage des eaux superficielles et souterraines aussi bien vers le nord que vers le sud.

### **3.4.2. CONCLUSION**

L'alimentation de la nappe de Guelmim peut donc s'effectuer suivant trois modalités :

- Alimentation par précipitation et par épandages des eaux de crue largement pratiquée dans le bassin de Guelmim
- Alimentation par écoulement souterrain avec l'aquifère des calcaires géorgiens et adoudouniens. En effet, l'examen de la carte piézométrique élaborée dans le cadre de cette étude montre une alimentation de la nappe en plusieurs endroits : au Nord, à partir du versant sud de l'anti-atlas par abouchement entre les calcaires adoudouniens et les calcaires lacustres, et au Nord-Est à partir des apports latéraux provenant du plateau de Bou Izakarn - Timoulay.
- Alimentation au niveau des lits d'oueds surtout en période de crue.

## **3.5. ETUDE DES SOURCES ET LEUR REGIME D'ECOULEMENT**

La plaine de Guelmim comporte des sources à rôle hydrogéologique non négligeable dans la région (Carte 23). Outre les calcaires géorgiens et adoudouniens qui livrent des sources en bordure, les calcaires lacustres d'âge plioquaternaire couvrant une grande partie de la vallée d'Oum Al Achar, sont le siège d'écoulements karstiques se manifestant par des sources à régime d'écoulement variable en liaison avec la pluviométrie de la région.

Dans ce paragraphe, nous procéderons à une description sommaire des sources de la région portant sur 3 points principaux : l'origine, l'importance et l'évolution dans le temps.

### **3.5.1. LOCALISATION ET ORIGINE**

#### **3.5.1.1 Sources de l'aquifère plioquaternaires**

Cette dénomination regroupe les sources suivantes :

- Source « Taraouarte » (31/88) à Ksabi ; et « Targa Wassay » (501/88) à Tisseguenane ;
- Groupe de sources situées au sud d'Abaynou : « Toutline » (113/88) captée à la surface du sol à proximité d'affleurement de calcaires lacustres conglomératiques ; « Waoutelte » 112/88 ; « Tabaouloute » (358/88) et « Iguissel » (359/88); leur débit est de l'ordre de 1 l/s. Et la source « Teghmert » (360/88) débitant en moyenne 27 l/s ;

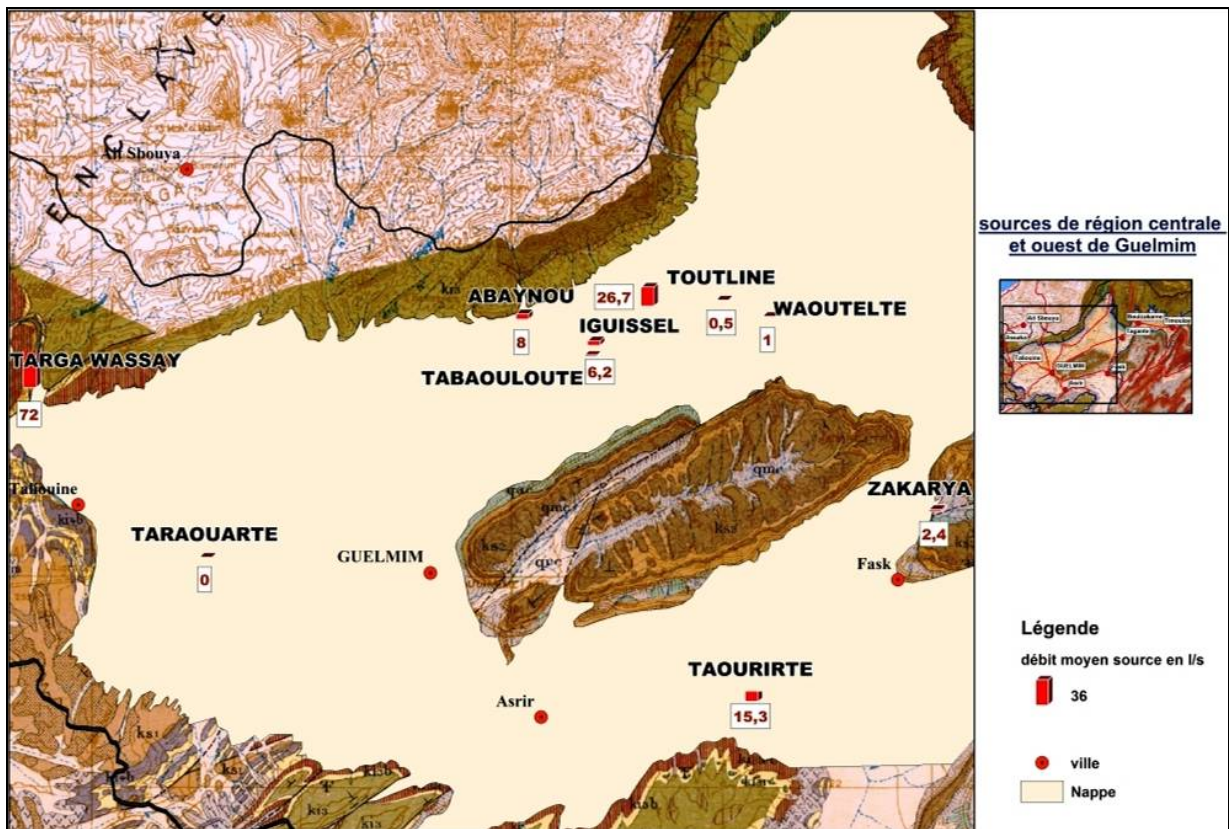
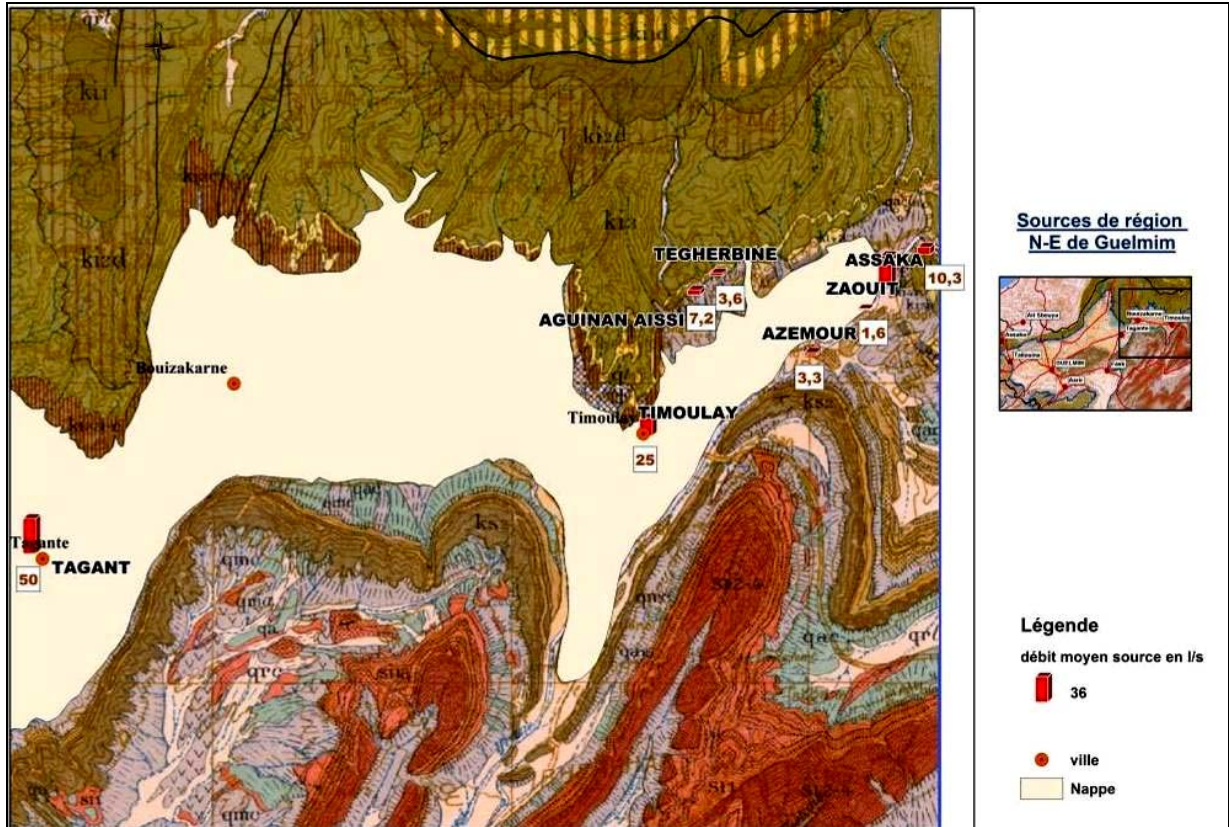
- Région de Timoulay Est : sources « Assaka » (18/88) qui sort des formations conglomératiques fluvio-lacustres (Dijon, 1966) et « Waguinouste » (19/88) qui sort d'un banc de calcaires conglomératiques;
- Sources « Zakarya » (13/88) au nord de Fask et « Taourirte » (14/88) à Tighmert.
- Source de « Tagant » (4/88) au Sud-Ouest de Bou Izakarn : c'est une large cavité profonde de 8 m, avec un plan d'eau de 60 m<sup>2</sup>, foncée dans des alluvions récentes et utilisée pour l'irrigation de l'oliveraie de Tagant. Il s'agit d'une source très productive qui débite en moyenne 50 l/s. Les essais de pompages réalisés en 1972 pour cette source ont fournis les caractéristiques suivantes (Agoussine, 1993):
  - Forte transmissivité  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  ;
  - Faible coefficient d'emmagasinement 0,02 % ;
  - Une indépendance relative vis-à-vis de l'aquifère de la plaine.
- Source Bou Izakarn 1/88: il s'agit d'une galerie naturelle profonde de 18 m foncée dans les calcaires lacustres où l'eau a été capté par khettara d'un kilomètre et surélevé par un seuil en tête jusqu'à 9m. Cette source a servi à la fois pour l'alimentation en potable du centre de Bou Izakarn et l'irrigation de la palmeraie jusqu'à 1984 où l'alimentation de ce centre a été prise en charge par l'ONEP. Depuis on ne dispose pas de données sur son évolution car elle n'est pas suivie.

Un essai de traçage au sel réalisé au niveau des deux dernières sources a confirmé leur appartenance au même système karstique. La vitesse de communication entre les deux points d'eau a été estimée à 2 km/h.

### 3.5.1.2 Sources des formations cambriennes

Il s'agit des sources dénombrées dans les calcaires adoudouniens et géorgiens de l'anti-atlas et dont la plupart n'ont en général que de faibles débits (inférieurs à 5 l/s). Ces sources sont réparties dans les 2 régions suivantes:

- Région d'Ifrane de l'anti-atlas : où existent un ensemble de sources dont les eaux sont issues de l'amont vers l'aval des calcaires inférieures de l'Adoudounien jusqu'aux calcaires supérieurs du Géorgien :
- Source Taskalla 30/88 qui prend naissance au contact des derniers bancs de la série schisto-calcaire et débite une dizaine de l/s;
- Source Tegherbine (191/88) qui sort des calcaires géorgiens en arrière desquelles s'étend une combe creusée dans les schistes de Timoulay ;
- Source Timoulay (3/88) alimentée par les calcaires géorgiens et fournissant un débit de l'ordre de 25 l/s.
- Région d'Abaynou : connue par la source thermique portant le même nom « Abaynou » (57/88). Les eaux de cette source sont fortement minéralisées, de température supérieure à 45° et à faciès sulfaté calcique, d'origine probable une faille géorgienne à l'ouest de Ouggoug. Les résultats de l'étude isotopique de 1995 obtenus (absence de nitrates, faible teneur en Tritium et en C14) ont confirmé une double alimentation par cheminement lent provenant des calcaires faillés d'âge Adoudounien et Géorgien.



Carte 23: Situation des sources de la région de Guelmim et leur débit moyen jaugé en 2004



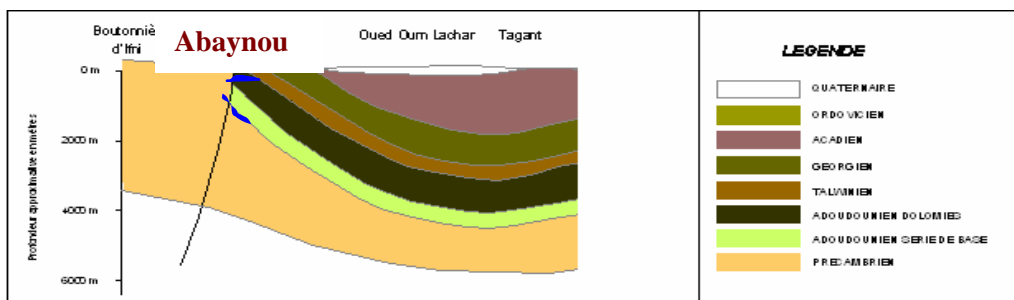


Figure 26: coupe illustrant l'origine profonde de la source d'Abaynou

### 3.5.2. EVOLUTION DANS LE TEMPS

La figure suivante illustre la fluctuation des débits jaugés en 2004 et permet de distinguer deux groupes de sources :

- Groupe 1 : sources des formations cambriennes, généralement à faibles débits. Du fait de l'important rôle régulateur des massifs calcaires, les débits de ces sources varient très peu.
- Groupe 2 : sources dont les débits sont plus importants mais à variation intra-annuelle importantes. Ce sont les sources alimentées par des circulations karstiques arrivant de la région d'Andja et de Tagant.

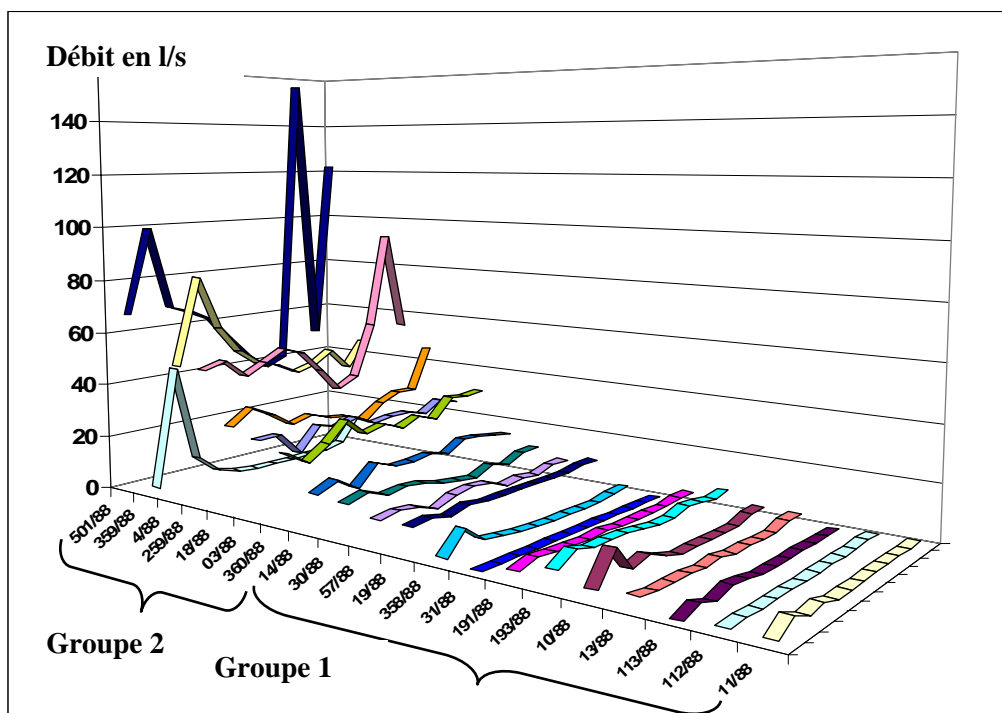


Figure 27: Evolution intra-annuelle des débits des sources de la région de Guelmim

L'analyse du régime de fluctuation des débits en comparaison avec la pluviométrie confirme ces résultats. Comme le montre les figures suivantes, les sources de Tagant et Iguissel présente une réponse suite à une crue donnée alors que les sources Abaynou et Timoulay sont moins sujettes aux fluctuations de la pluie.

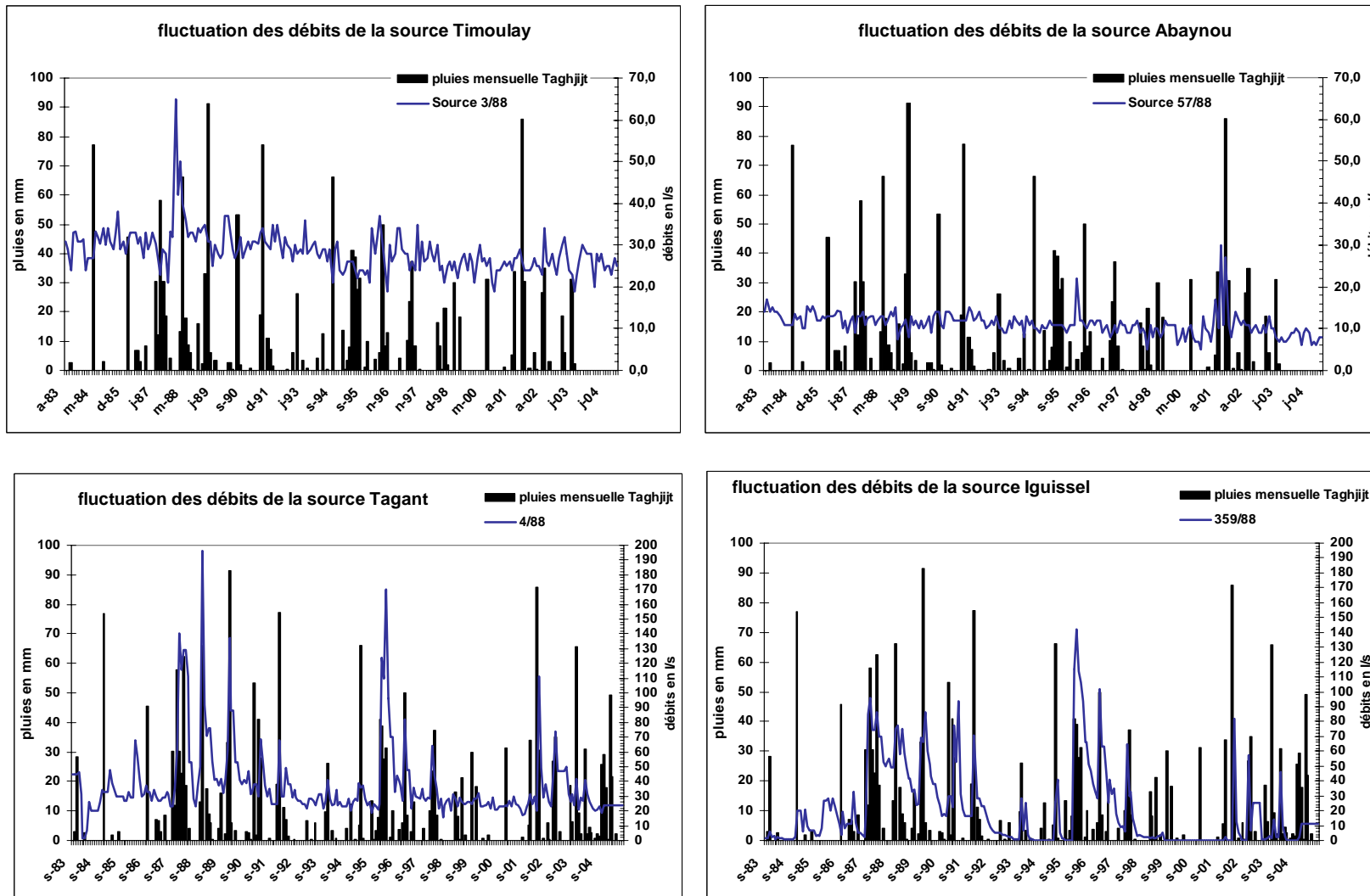


Figure 28 : Fluctuation des débits des Sources entre 1983 et 2005

### 3.6. ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE

#### 3.6.1. PARAMETRES CHIMIQUES

Pour la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de la plaine de Guelmim, nous disposons des données suivantes :

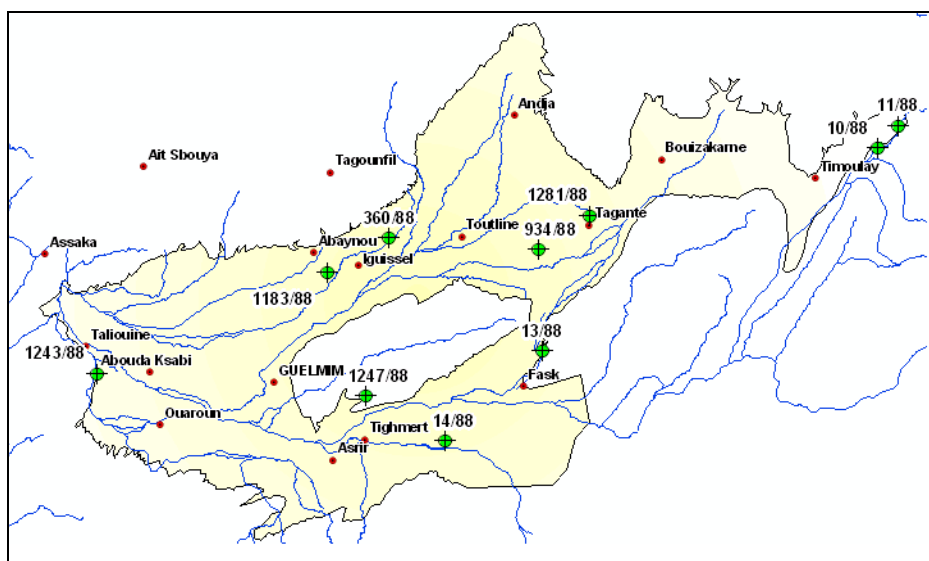
- Résultats d'analyses chimiques de 28 échantillons effectués lors des différentes campagnes de sondage
- Analyses réalisés dans la cadre d'une collaboration DRPE - AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) sur 33 échantillons en Mai et Octobre 1995,
- Analyses physico-chimiques pour une dizaine de points constituant le réseau de suivi de la qualité des eaux de la DRH pour les années 2001, 2002 et 2004. Ces analyses consistent au dosage des éléments chimiques (anions + cations), à la mesure des paramètres physiques (T°, conductivité hydraulique, résidu sec...), biologiques et de pollution (Matière organique, coliformes totaux et fécaux, et streptocoques fécaux). Cependant, le nombre et la répartition de ces points de suivi est loin d'être suffisante pour répondre aux objectifs souhaités. En effet, la carte suivante montre que ce réseau ne couvre pas la totalité de l'étendue de la nappe, surtout la partie ouest de la plaine la plus sujette aux problèmes de salinisation.

Ainsi, nous tenterons à travers cette étude hydrogéochimique d'exploiter le maximum de données disponibles pour pouvoir porter un jugement sur la qualité des eaux pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable, la circulation des eaux à travers les différentes formations aquifères et leurs relations avec les eaux de surface d'une part et les eaux des nappes profondes d'autre part.

#### 3.6.2. DETERMINATION DES FACIES CHIMIQUES

Les analyses chimiques les plus récentes (effectués en 2004) complétés par les résultats des campagnes de 1995 et des anciennes analyses ont été retenues pour couvrir toute l'étendue de la nappe de Guelmim. La carte suivante montre la répartition des points suivis par la DGH.

Carte 24 Répartition des points de suivi de la qualité de la nappe / DGH





Les résultats de ces analyses sont reportés sur le diagramme logarithmique de Schoeller-Berkaloff. Les graphiques suivantes (Figure 29 et 31) ont permis d'identifier les faciès chimiques suivants :

- Faciès chlorurés calciques dans la vallée d'oued Oum Al Achar au Nord de la plaine et jusqu'à Tagant, chloruré sulfato-sodique à l'est de Ksabi, au N-W et au S-W, évoluant vers un faciès chloruré sodique à l'ouest de la plaine ;
- Faciès sulfato-sodique au Sud d'Asrir et dans la plaine de Fask ;
- Faciès sulfato-calcique au Nord-Ouest de la plaine près de la région d'Abaynou ;
- Faciès bicarbonatés calciques au N-E de la plaine au contact des massifs calcaires, au centre et au Sud de la plaine, et localement bicarbonaté magnésien à Toutline au Nord.

### 3.6.3. QUALITE DE LA NAPPE SOUTERRAINE

La nappe est de bonne qualité dans la vallée d'Oum Al Achar jusqu'à la plaine de Bou Izakarn-Timoulay et dans la trouée de Fask à cause de l'élévation de la zone (gradient hydraulique élevé) et de la circulation rapide dans les calcaires qui constituent le faciès des zones saturées dans ces secteurs.

Cependant, une zone plus chargée en sel se trouve à l'ouest de la nappe (triangle Taliouine – Ksabi – Ouaroun) à cause de l'effet de l'évaporation du à la remontée de la nappe dans cette zone. La surface de cette zone a diminué ces dernières années à cause du développement des pompes agricoles.

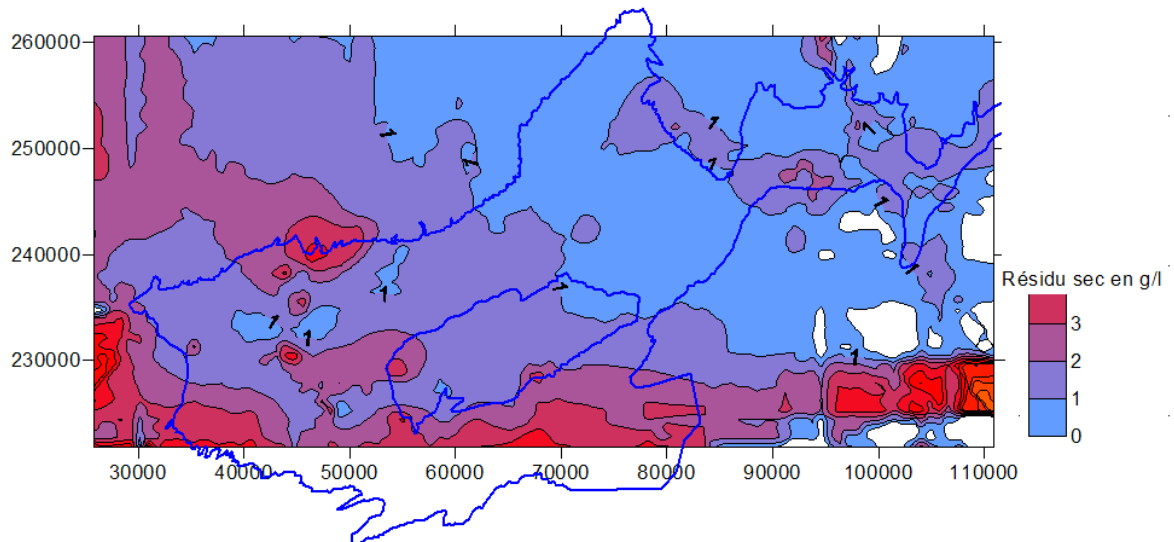
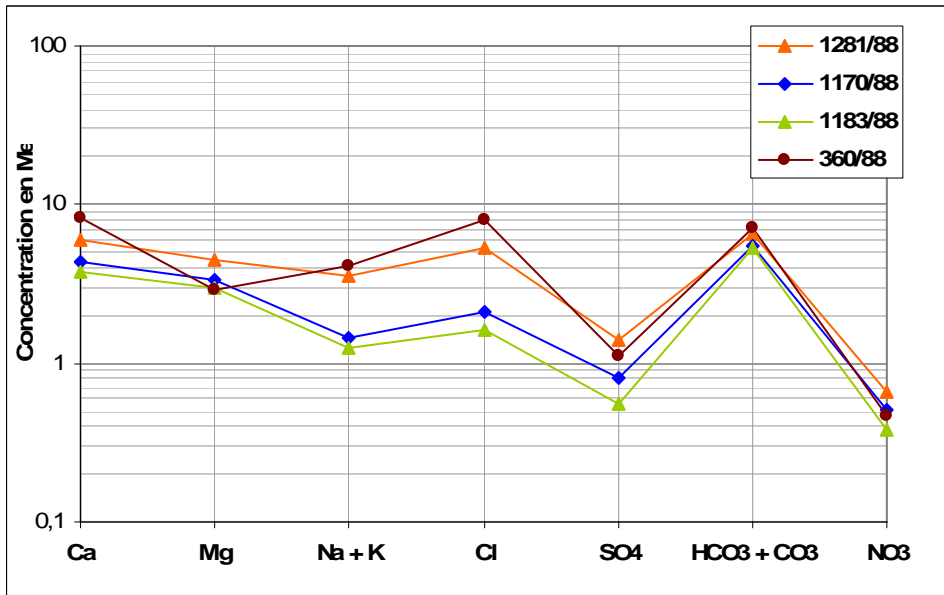
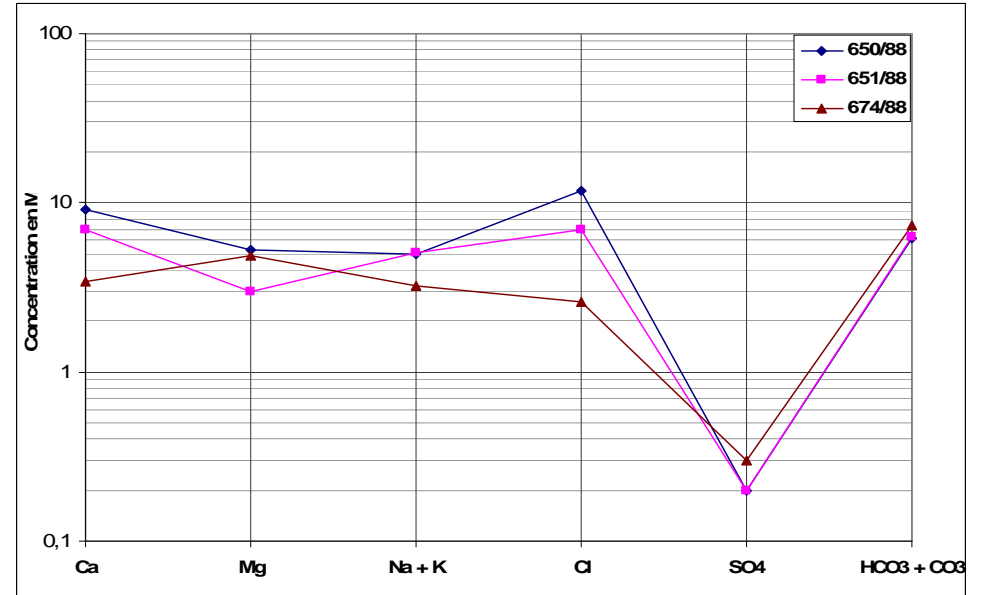


Figure 29 : Esquisse de la carte des résidus secs (données de l'enquête de Juillet 2005)

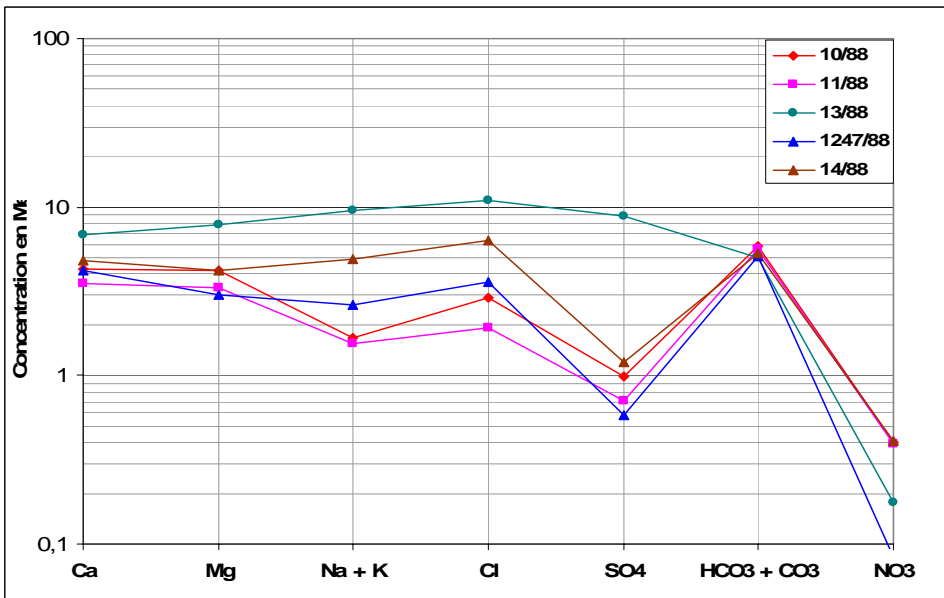
Figure 30 : Diagrammes d'analyses d'eau de Scholler et Berkaloff



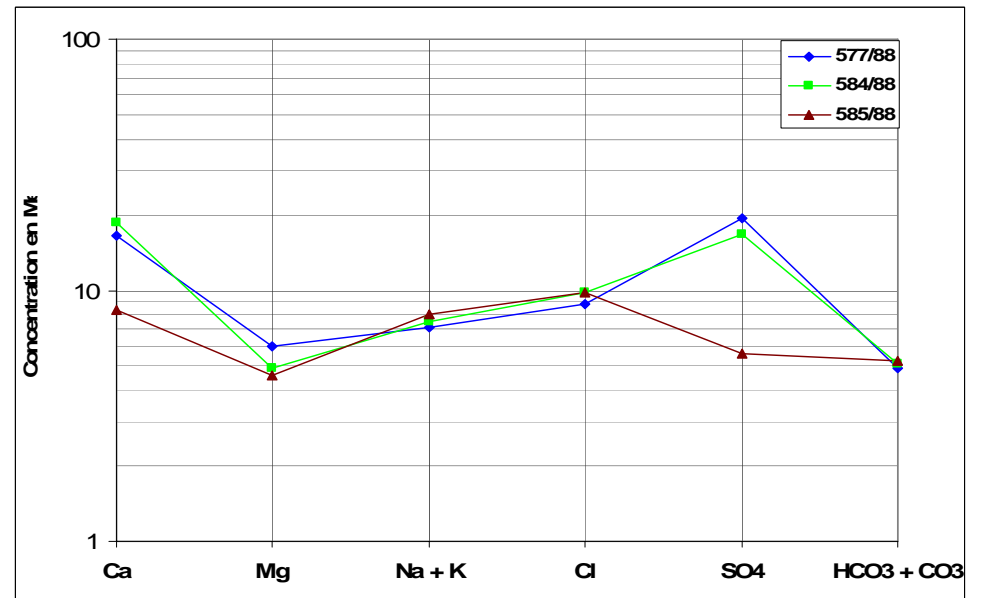
**Axe Igoussal vers Tagant (Nord) (analyses de 2004)**



**Région Nord ( Andja)**

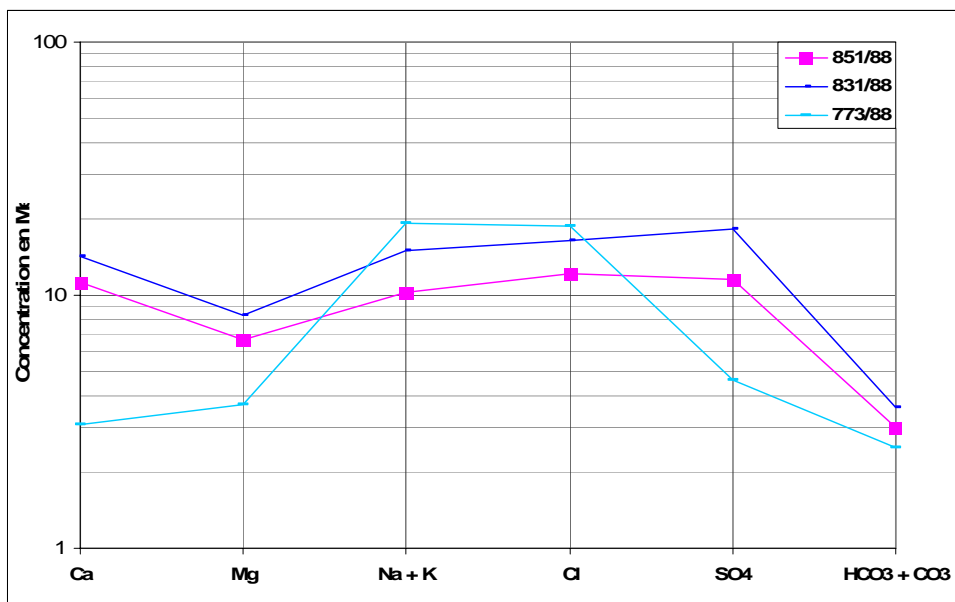


**Sources N-E (10/88 et 11/88) + région de Fask (analyses de 2004)**

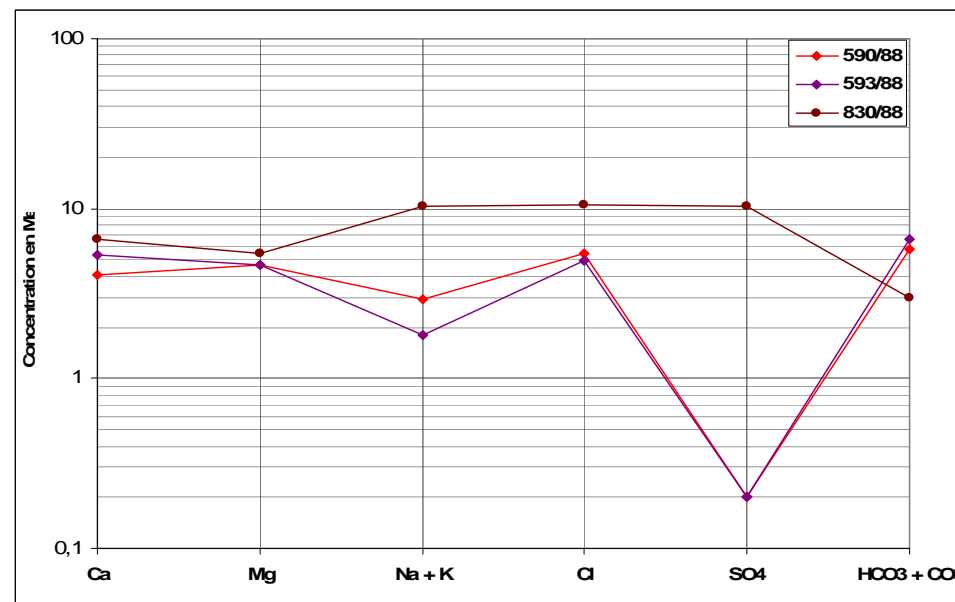


**Région Nord-Ouest**

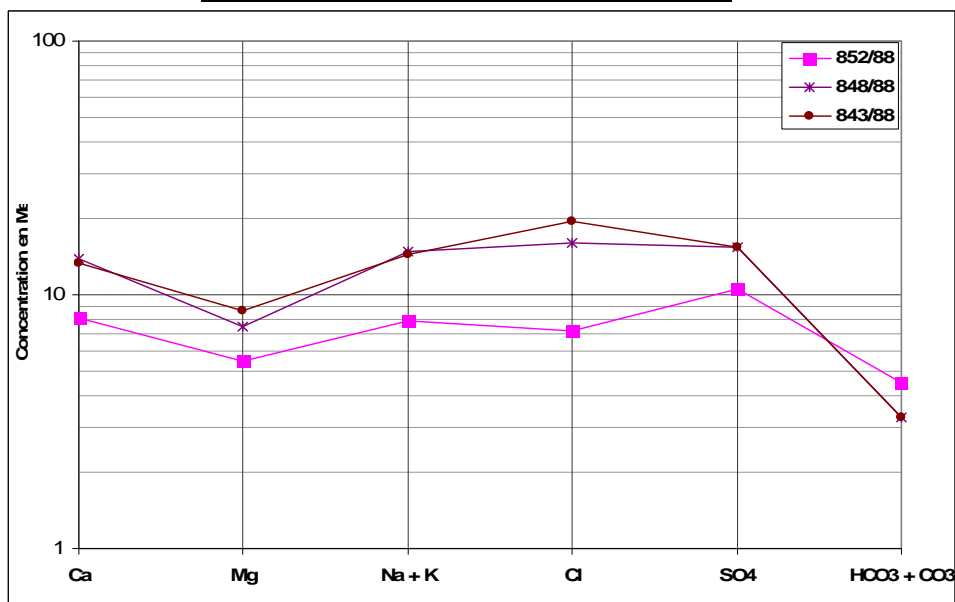
Figure 30-bis : Diagrammes d'analyses d'eau de Scholler et Berkaloff



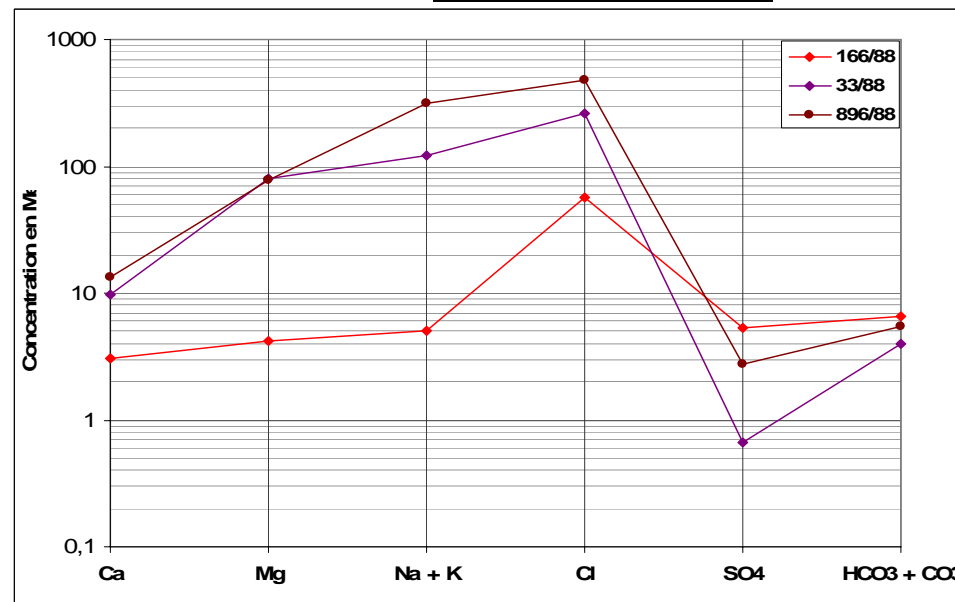
**Région sud entre Asrir et sud de Ouaron**



**Région centrale (Guelmim)**



**Région S-W ( Ksabi et W de Ouaron)**



**Région Ouest vers Taliouine (analyses de 1995)**

## **CHAPITRE 4. ELABORATION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA NAPPE DE GUELMIM**

Ce chapitre apporte une nouvelle méthodologie pour l'appréciation de l'état d'équilibre de la nappe de Guelmim basée sur:

- Le découpage de la nappe en unités homogènes sur la base de critères hydrogéologiques et socio-économiques judicieusement choisis ;
- Le calcul détaillé du bilan hydrogéologique pour chaque unité de la nappe pour une période s'étalant de 1989 à 2005.

### **4.1. DELIMITATION AGRO-HYDROGEOLOGIQUE DE ZONES HOMOGENES DE LA NAPPE DE GUELMIM**

En vue d'appréhender la diversité de la zone d'étude en terme de potentialités hydriques et agricoles, nous allons dans ce chapitre procéder à un zonage spatial de l'étendue de la nappe superficielle, principale ressource en eau de la région, par croisement des différentes données physiques et socio-économiques, en exploitant les résultats issues de l'étude hydrogéologique et du dépouillement de l'enquête sur les prélèvements de 2005 effectués dans le cadre de cette étude, en plus des résultats des différentes études et enquêtes réalisées sur cette région.

L'intérêt de ce zonage réside dans la définition et la mise en relation des différentes unités homogènes de gestion de la nappe de Guelmim, à travers l'élaboration du modèle conceptuel du fonctionnement de cet aquifère. Il constitue donc un préalable aux prochaines étapes concernant la construction du modèle hydrogéologique d'une part et la proposition d'un outil de gestion permettant d'aboutir à un scénario optimal d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim.

#### **4.1.1. CHOIX DES VARIABLES ET DES INDICATEURS**

S'agissant d'une approche qui devrait appréhender la ressource en eau souterraine intégrée dans son contexte socio-économique environnant, les variables retenues ont été élargies pour couvrir, en plus des caractéristiques purement hydrogéologiques, quelques aspects socio-économiques.

Ainsi, les grandes variables qui déterminent les profils de chaque unité distincte peuvent être articulées autour des principaux axes suivants :

- Les ressources en eau ;
- L'agriculture ;
- La population et ses besoins en eau potable.

##### **4.1.1.1 Les ressources en eau**

###### **a - Ressources en eau de surface**

Les aménagements hydro-agricoles réalisés ou projetés ont un impact direct sur l'amélioration de la recharge de la nappe souterraine et le développement de l'agriculture, et constituent donc un bon

indicateur sur les moyens réels dont dispose la région de Guelmim en matière de mobilisation des eaux de surface.

Ainsi, nous avons retenu les deux variables suivants :

- Localisation des périmètres de PMH et d'épandage d'eau de crue ;
- Superficies irriguées par épandage des eaux de crue.

### **b - Ressources en eau souterraine**

L'étude hydrogéologique menée dans le cadre de cette étude n'est pas uniquement du type «état des lieux» qui s'appuie sur la description mais plutôt du type «dynamique», qui privilégie un questionnement sur l'évolution de cette ressource et une problématique qui débouche sur un plan d'actions. Ainsi, le canevas retenue comprend 13 variables réparties en 8 volets comme suit :

- Stock mobilisé en eau souterraine : épaisseur et faciès de la zone saturée ;
- Tendence générale de la nappe : variation annuelle du niveau piézométrique pour les dix dernières années ;
- Aptitude à la recharge naturelle ou artificielle : épaisseur et faciès de la zone non saturée ;
- Alimentation éventuelle par des apports latéraux ou par abouchement souterrain ;
- Alimentation par retours d'eau d'irrigation au niveau des oasis irriguées à partir des sources et khetaras de la région : situation des sources et superficie totale des oasis ;
- Perte par évaporation : Profondeur de la nappe par rapport au sol ;
- Perte par des sources : débit total annuel ;
- Qualité de la nappe : salinité, teneur en nitrates ;
- Possibilité d'exploration des aquifères profonds : Localisation de zones à fort potentiel pour la réalisation de sondages captant dans les calcaires géorgiens.

#### **4.1.1.2 L'agriculture**

On s'intéressera surtout aux terres irriguées par pompage à partir de la nappe (celles irriguées par épandage des eaux de crue ont été déjà évoquées (p.83)).

Pour construire une typologie des terres agricoles, plusieurs variables sont envisagées. Ces derniers peuvent être classées en plusieurs familles notamment les variables liées au foncier, au système de culture, au mode d'irrigation, aux techniques agricoles, à l'intensification agricole, à l'intégration intersectorielle, etc. Le choix final dépendra de la qualité et la quantité de l'information disponible. Ainsi pour la caractérisation des zones irriguées par pompage, nous disposons de deux sources de données :

- Une enquête menée par la Direction du Développement et de la Gestion de l'Irrigation (DDGI) en 1997, complétée en 1999 et actualisée en 2002. Elle a permis de cerner l'ensemble de l'irrigation privée sur la Province de Guelmim. A cette date, elle atteignait 3 480 ha.
- Une enquête sur les prélèvements dans la nappe réalisée en juillet 2005 spécifiquement pour l'étude dans laquelle s'insère le présent travail.

De l'examen des différents résultats obtenus de ces deux enquêtes, nous avons retenues les indicateurs suivants :

- Le potentiel agricole : Superficie irriguée ;
- Le poids des prélèvements agricoles ;
- Volumes prélevés ;
- Evolution des superficies irriguées par pompage ;
- La typologie des exploitations agricoles : taille des exploitations en ha ;
- L'intensification agricole :
- Le taux d'occupation des principales spéculations : maraîchage, céréales, arboriculture et cultures fourragères ;
- Les modes d'irrigation pratiqués.

#### 4.1.1.3 L'alimentation en eau potable

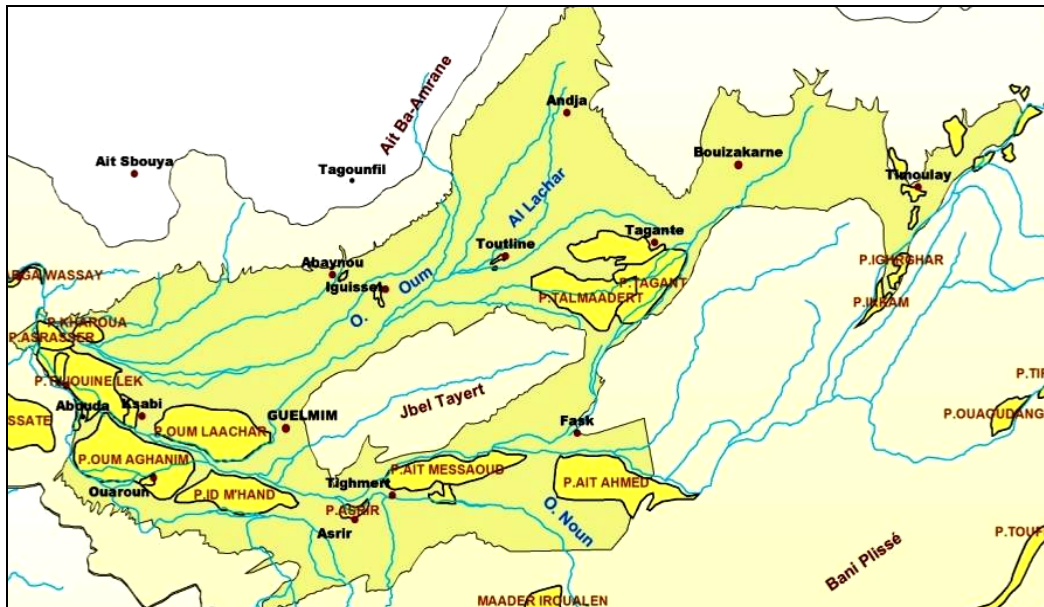
Il s'agit d'évaluer l'importance de la demande en eau potable des villes et centres urbains dont l'alimentation est effectuée à partir de la nappe de Guelmim. Ainsi, le principal critère retenu pour cette évaluation est la situation des captages pour l'alimentation en eau potable

### 4.1.2. PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ANALYSE

#### 4.1.2.1 Les ressources en eau

##### a - Ressources en eau de surface

La carte ci-dessous montre une concentration des périmètres d'épandage au Sud-Ouest de la nappe de Guelmim entre Asrir et Taliouine.



Carte 25 : Périmètres d'épandage d'eau de crue de la plaine de Guelmim

## **b - Ressources en eau souterraine**

La nappe de Guelmim a fait l'objet d'une étude détaillée au chapitre précédent traitant l'hydrogéologie de la plaine de Guelmim. Cette étude a permis de dégager une connaissance fine et objective de cette ressource, et d'apprécier ces potentialités et de tirer des conclusions quant à sa vulnérabilité face aux besoins croissants en eau agricole et potable.

Dans ce qui suit nous allons reprendre certaines informations utiles pour la construction d'une typologie basée sur la caractérisation hydrogéologique de cet important aquifère selon les critères et variables choisis au paragraphe précédent.

### **i. Stock mobilisé en eau souterraine**

Totalisant une superficie de 1177.5 km<sup>2</sup>, et d'une épaisseur moyenne de 31 m, et d'un coefficient d'emménagement moyen de 1 %, cette nappe constitue une réserve totale de 365 Mm<sup>3</sup>. En se référant à la carte de l'épaisseur de la zone saturée (p.57), nous constatons que la nappe a une épaisseur inégale : supérieure à 30 m au Nord et au Nord-Est, généralement entre 10 et 30 m au Nord-Ouest et au sud dans la vallée des oueds Seyyad et Ouerguennoun, et de faible épaisseur (< à 10 m) au centre entre Guelmim et Ksabi. Les faciès les plus perméables (calcaires lacustres) rencontrés au Nord et Nord-Est de la plaine, passent à des calcaires –marneux et marno-calcaires moins perméables en direction de l'Ouest, et à des marnes sableuses au Sud.

Ainsi la nappe peut être divisé en trois secteurs distincts :

- Secteur Nord et Nord-Est : à épaisseur importante et faciès de la nappe très favorable ;
- Secteur Sud : à épaisseur et perméabilité moyennes des terrains aquifères ;
- Secteur Ouest : à faible épaisseur et faible perméabilité.

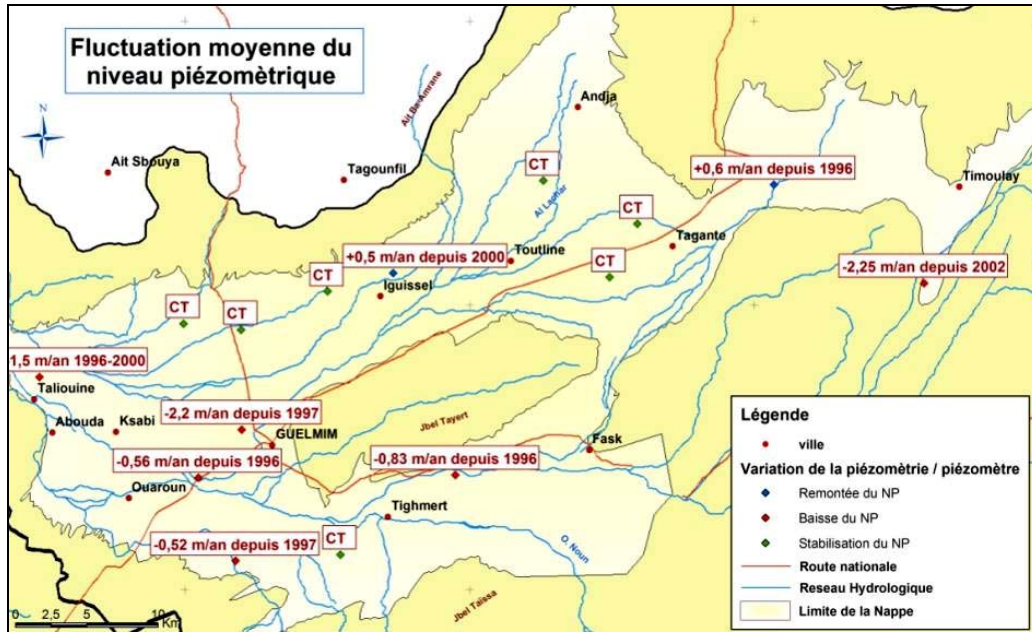
### **ii. Tendance générale de la nappe**

Le calcul de la variation moyenne annuelle du niveau piézométrique pour les dix dernières années a été réalisé selon deux méthodes :

La première consiste à calculer cette variation au niveau de chaque point de mesure entre 1996 et 2005. La carte suivante montre que la tendance générale est :

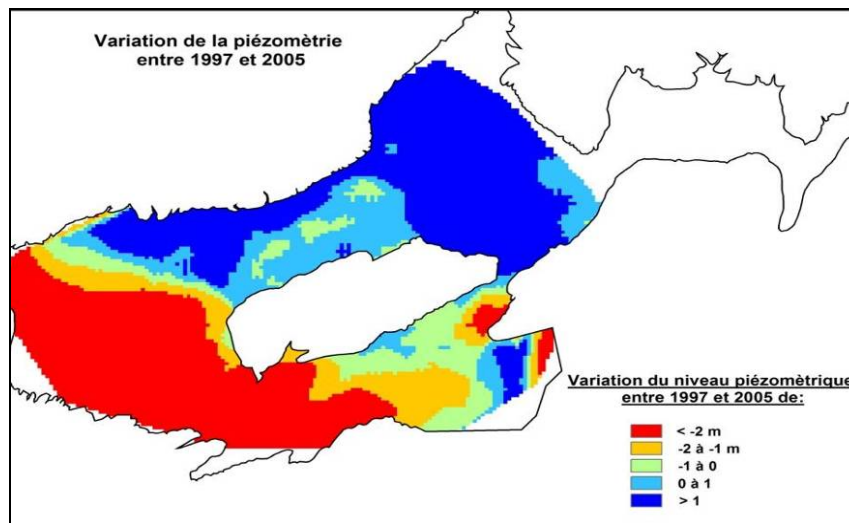
- Une stabilisation du niveau piézométrique au Nord et Nord-Est de la plaine voir une légère remontée au N-E entre Tagant et à Iguissel
- Une baisse du niveau piézométrique, moins de 1 m/an au Sud et au Sud-Ouest de la plaine, et de 1.5 jusqu'à 2.2 m/an à l'ouest de la plaine entre Guelmim et Taliouine et au Sud de Timoulay au Nord-Est.





Carte 26 : Variation de la piézométrie par point de mesure entre 1996 et 2005

La deuxième méthode consiste à cartographier sur SIG la différence de la piézométrie entre 1997 et 2005. Cette méthode, bien que moins précise que la précédente à cause de l'imprécision de la carte piézométrique de 1997 (qui ne couvrent pas toute l'étendue de la nappe), confirme la tendance obtenue par la première méthode comme le montre la carte suivante :



Carte 27 : Variation de la piézométrie par différence des cartes piézométrique de 1997 et 2005

### iii. Aptitude à la recharge naturelle ou artificielle

L'aptitude à la recharge est appréciée par deux paramètres essentiels : épaisseur et faciès de la zone non saturée. Selon le premier critère, nous pouvons faire le zoning suivants (voir cartes p.58 et p.67):

- Zone à épaisseur > à 20 m s'étalant du Nord de Guelmim et le long de l'oued Oum Al Achar au Nord et jusqu'au Nord-Est de la plaine, et sur l'axe menant Tagant à Fask à l'Est ;

- Zone à épaisseur généralement < à 10 m au S et à l'Ouest de la plaine ;
- Le croisement avec le deuxième critère fait ressortir deux zones potentielles de recharge ;
- Zone s'étalant du centre de la plaine (alentour de la ville de Guelmim) jusqu'à Andja au Nord suivant le tracé de l'oued Oum Al Achar, où la zone saturée est formé de terrains alluvionnaires d'épaisseur < à 20 m à Guelmim et dépassant les 20 m ailleurs (jusqu'à 40 m à Andja) ;
- Zone située entre Tagant et Fask où l'épaisseur des alluvions varie de 20 à 30 m.

#### **iv. Alimentation éventuelle par des apports latéraux ou par abouchement souterrain**

La carte piézométrique de 2005 a mis en évidence une zone d'alimentation par abouchement de la nappe profonde le long de la bordure N depuis Abaynou jusqu'au Nord-Est de Toutline, et la zone Nord et Nord-Est de la plaine soumise à des apports latéraux de provenance des formations géorgiennes du N du bassin (massif des Akhssas).

#### **v. Alimentation par retours d'eau d'irrigation au niveau des oasis irriguées à partir des sources et khetaras**

Plusieurs sources et khetaras, sortant généralement au niveau d'affleurements géologiques favorables, sont utilisés pour l'irrigation pérenne d'une superficie de 3000 ha d'oasis. Ces oasis contribuent à l'alimentation de la nappe de Guelmim par retours d'eau d'irrigation.

La répartition des sources et oasis dans l'espace nous permet de distinguer deux zones :

- Zone Nord-Est du bassin (Taghjijt, Ifrane de l'Anti Atlas, Tagant et Bou Izakarn) où ces oasis totalisent une superficie de 1620 ha ;
- Zone Sud et Ouest de la plaine (Fask, entre Asrir et Taliouine, Iguissel et Toutline) où des sources essentiellement d'origine plioquaternaire servent pour l'irrigation de 550 ha d'oasis.

#### **vi. Perte par des sources :**

Mise à part les sources d'origine profonde situées sur la bordure Nord et Nord-Est, les autres sources et résurgences sont liés à l'aquifère plioquaternaire et constituent donc une sortie dans le bilan de la nappe de Guelmim. En se référant à leur débit enregistré en 2004, nous pouvons répartir ces sorties par secteur de la nappe comme suit :

Tableau 6 : Débit des sources d'origine plioquaternaire pour l'année 2004

| nom                           | IRE    | Débit moyen en l/s | Volume annuel en Mm <sup>3</sup> |
|-------------------------------|--------|--------------------|----------------------------------|
| WAOUTELTE                     | 112/88 | 1,0                | 0,03                             |
| TOUTLINE                      | 113/88 | 0,5                | 0,01                             |
| TABAOULOUTE                   | 358/88 | 1,7                | 0,1                              |
| IGUISSEL                      | 359/88 | 6,2                | 0,2                              |
| TEGHMERTE                     | 360/88 | 26,8               | 0,8                              |
| TAGANT                        | 4/88   | 50,0               | 1,4                              |
| <b>Somme secteur Nord</b>     |        | 86,2               | 2,6                              |
| ASSAKA                        | 18/88  | 30,1               | 1,0                              |
| WAGHINOUSTE                   | 19/88  | 9,3                | 0,3                              |
| <b>Somme secteur Nord-Est</b> |        | 39,3               | 1,2                              |
| ZAKARYA                       | 13/88  | 2,5                | 0,1                              |
| TAOURIRTE                     | 14/88  | 15,3               | 0,5                              |
| <b>Somme secteur S</b>        |        | 17,8               | 0,6                              |
| TARAOUARTE                    | 31/88  | 0,0                | 0,0                              |
| TARGA WASSAY                  | 501/88 | 71,9               | 2,3                              |
| <b>Somme secteur Ouest</b>    |        | 71,9               | 2,3                              |
| <b>TOTAL</b>                  |        | <b>215,2</b>       | <b>6,7</b>                       |

#### vii. Perte par évaporation

La carte de profondeur de la nappe par rapport au sol de 2005 a mis en évidence une zone soumise à l'évaporation (profondeur < à 10 m) à l'ouest de la nappe, depuis le Sud de Ouaron jusqu'à Taliouine.

#### viii. Qualité de la nappe

L'analyse de la carte des résidus secs (p. 81) confirme un problème de salinité au niveau du secteur aval de la nappe soumis à une évaporation intense. En général, le secteur ouest de la nappe est caractérisé par une salinité élevée alors que pour le reste l'eau est de bonne qualité.

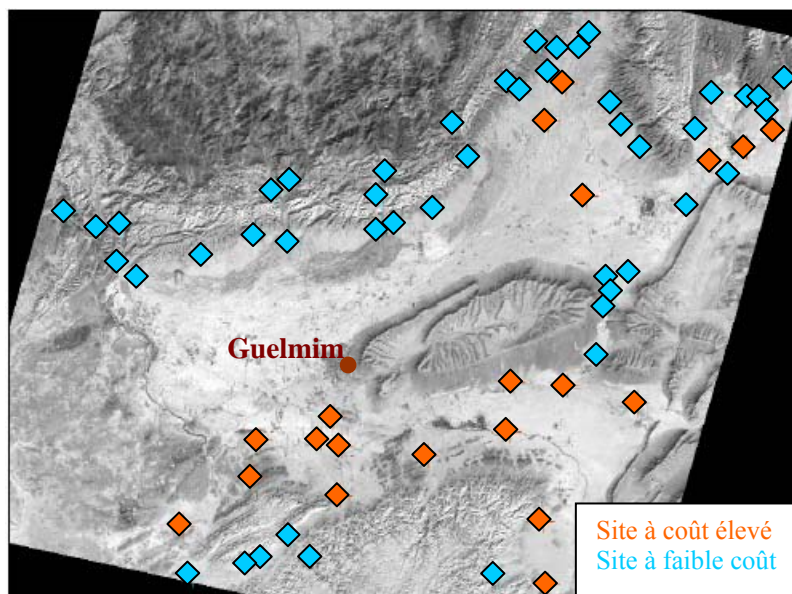
#### ix. Possibilité d'exploration des aquifères profonds

Une étude pilote par télédétection pour l'exploration des eaux souterraines en zone aride a été entreprise par le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS) en 2001 dans le but de localiser les zones à fort potentiel pour la réalisation de sondages captant dans l'aquifère profond.

La carte ci-dessous récapitule les centres de cibles à fort potentiel aquifères destinés à l'usage pour des travaux géophysiques ultérieurs. Les symboles indiqués en bleu représentent les sites à faible coût (à cause de la faible profondeur du toit de cet aquifère par rapport au sol) et ceux en rouge représentent les sites à coût plus élevé pour l'exploration des nappes profondes de la région de Guelmim. La répartition des cibles fait ressortir deux zones distinctes :

- Secteur s'étalant le long de la bordure Nord et Nord-Est de la nappe à fort potentiel et à moindre coût.

- Secteur s'étalant le long de la bordure Sud de la nappe qui renferme moins de sites potentiels que le premier secteur et à coût plus élevé.



Carte 28 : Localisation des centres de cibles à fort potentiel pour l'exploration des nappes profondes (CRTS, 2002)

#### 4.1.2.2 L'agriculture

##### a - Le potentiel agricole

A la faveur d'une nappe facilement accessible, la plaine de Guelmim a connu l'expansion d'une agriculture irriguée par pompage direct de la nappe. Ainsi, la DRPE a réalisé une enquête exhaustive en juillet 2005 pour cerner les superficies et les prélèvements à partir de la nappe. Le dépouillement de cette enquête a révélé que la superficie irriguée par pompage est de 1665.9 ha. Elle est inférieure à la superficie recensée par l'enquête sur l'irrigation privée de 2002.

Comme le montre le tableau suivant, la comparaison des résultats de l'enquête 2005 avec celle réalisée en 2002 sur l'irrigation privée montre que les différences importantes sont constatées sur les communes Asrir, Guelmim et Laqsabi, qui totalisent 1 674 ha. Ceci laisse supposer, vu la diminution importante de la superficie irriguée recensée, que l'enquête de 2005 n'a pas touché certaines zones. Ce constat est confirmé par les statistiques de 1989: sur Guelmim, la superficie irriguée était déjà de 185 ha (elle est supérieure à celle recensée en 2005) et sur Laqsabi, elle était de 237 ha.

**Tableau 7 : Superficies irriguées par pompage et par commune obtenues par les deux enquêtes**

| Commune             | Surface irriguée par pompage (ha) |                                |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|                     | Enquête prélèvement 2005          | Enquête Irrigation privée 2002 |
| ABAYNOU             | 349.5                             | 341.5                          |
| ADAY                |                                   | 50.0                           |
| AMTDI               |                                   | 8.7                            |
| ASRIR               | 359.1                             | 1031.0                         |
| BOUIZAKARN          | 5.3                               | 4.5                            |
| FASK                | 51.9                              | 120.0                          |
| FOUM FAST           | 10.5                              |                                |
| GUELMIM             | 35.3                              | 407.0                          |
| IFRANE ATLAS SAGHIR | 190.6                             | 107.0                          |
| LABYAR              |                                   | 50.0                           |
| LAQSABI TAGOUST     | 312.3                             | 943.0                          |
| TAGANTE             | 96.8                              | 107.5                          |
| TAGHJJT             |                                   | 56.0                           |
| TALIOUINE ASSAKA    | 69.9                              | 148.5                          |
| TIGLIT              |                                   | 3.0                            |
| TIMOULAY            | 184.9                             | 102.0                          |
| Total               | <b>1665.9</b>                     | <b>3479.7</b>                  |

Ainsi, les résultats de l'enquête de 2002 seront retenus pour le reste de cette analyse.

#### **b - Le poids des prélèvements agricoles :**

Vu les différences des superficies entre les enquêtes de 2002 et celle de 2005, nous nous sommes basés pour l'évaluation des prélèvements sur la première enquête. En effet, les données de l'enquête irrigation privée de 2002 ont permis de ressortir par mode d'irrigation les principales cultures pratiquées en irriguées dans la zone. Les besoins en eau pour ces cultures calculées selon la formule de Blaney-Criddle totalisent 31,2 Mm<sup>3</sup>/an. Le détail du calcul est présenté en annexe.

Les besoins annuels en eau de l'assolement pratiqué sur la base de cette enquête sont évalués à 12 000 m<sup>3</sup>/ha en gravitaire avec une efficacité à la parcelle de 70%; une partie des cultures étant irriguées avec le système localisé (50% des surfaces, avec principalement les plantations), dont les besoins sont de l'ordre de 7 000 m<sup>3</sup>/ha avec une efficacité à la parcelle de 90%, on peut considérer que les prélèvements moyens des exploitations à partir de la nappe sont de l'ordre de 11 000 m<sup>3</sup>/ha, compte tenu du taux d'intensification culturale de l'ordre de 116%.

En ce qui concerne l'exploitation des données de l'enquête 2005, d'autres méthodes d'évaluation des prélèvements ont été utilisées et chacune de ces méthodes a été croisée avec les résultats du calcul des besoins en eau pour les superficies correspondantes afin de valider les résultats de la première enquête. Ces méthodes utilisent une approche et des données différentes :

- Les données relatives aux structures de stockage, combinées aux données relatives à la durée de fonctionnement des équipements de pompage installés : Les données relatives aux structures de stockage comme les bassins d'irrigation et les réservoirs de stockage : la durée nécessaire pour

remplir ces structures de stockage, par les eaux souterraines, informe directement sur les débits de pompage :

$$[Q_{\text{exploitation}} \text{ m}^3/\text{h}] = [\text{Capacité utile de stockage (m}^3)] / [\text{Durée de remplissage (Heures)}]$$

Combiné aux données relatives à la durée de fonctionnement des équipements de pompage installés, ce débit d'exploitation permet d'estimer les quantités prélevées par jour, par semaine, par mois et par an de manière satisfaisante.

- Les mêmes données relatives à la capacité de stockage et combinées à la fréquence de remplissage permettent également d'apprécier les quantités prélevées :

$$[\text{Prélèvement / mois}] = [\text{Volume stocké m}^3] * [\text{Fréquence remplissage / mois}]$$

$$[\text{Prélèvement / an}] = [\text{Volume stocké m}^3] * [\text{Durée d'utilisation mois / an}] \text{ ou} \\ = [\text{Volume stocké m}^3] * [\text{Fréquence remplissage / an}]$$

- Les données sur les débits d'exploitation déclarés par l'exploitant à combiner au temps de fonctionnement des équipements de pompes.
- Evaluation des prélèvements sur la base des volumes déclarés : Cette méthode est basée sur les volumes de prélèvements déclarés avec le pourcentage d'affectation à l'irrigation.

Le tableau suivant donne une comparaison entre les différentes méthodes qui ont été utilisées :

**Tableau 8 : Comparaison entre différentes méthodes d'évaluation des prélèvements**

| Méthode  | Nb. Exploitations renseignées | Superficie correspondante (ha) | Prélèvements (millions de m <sup>3</sup> ) | Prélèvements Assolement (millions de m <sup>3</sup> ) | Dif. (%) |
|--|-------------------------------|--------------------------------|--|---|----------|
| Structures de stockage et débit exploitation       | 215                           | 445.3                          | 4.97                                       | 31,2  | 18%      |
| Structures de stockage et fréquence de remplissage | 228                           | 391.8                          | 2.01                                       | 3.55  | -43%     |
| Débit et durée d'exploitation                      | 628                           | 1 539.8                        | 16.7                                       | 14.8  | 13%      |
| Volume déclaré                                     | 474                           | 1 422.1                        | 8.8  | 12.7  | -31%     |

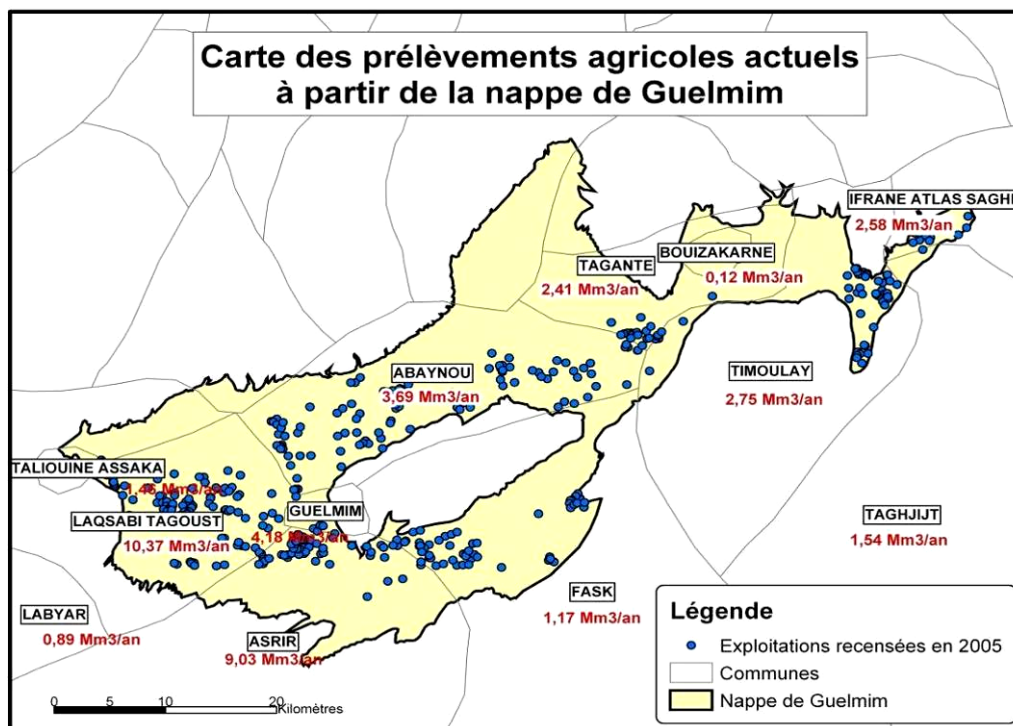
De l'analyse de ce tableau, nous constatons que les méthodes basées sur les déclarations des exploitants ne sont pas précises, pour les raisons suivantes :

- La volonté des agriculteurs de minimiser l'importance des volumes prélevés ;
- L'incertitude liée à l'estimation de paramètres, surtout annuels, comme c'est le cas pour la fréquence du remplissage de réservoir de stockage par an utilisé dans la 2ème méthode, et les volumes annuels prélevés (4<sup>ème</sup> méthode).

Nous constatons par contre que pour les méthodes 1 et 3, les résultats sont dans un intervalle de ± 20%, par rapport aux calculs des prélèvements faits sur la base des assolements et dotations par culture. Pour ces deux méthodes, les paramètres renseignés sont plus précis : les durées d'exploitations sont détaillées (nombre d'heures par jour, nombre de jour par semaine, ...etc.) et les débits d'exploitation ont été mesurés dans 50% des cas et estimés dans 49% des cas.



En conclusion, nous avons retenus les valeurs de prélèvements calculés sur la base des assolements qui sont évalués à 31,2 Millions de m<sup>3</sup>. La répartition par commune est présentée sur la carte suivante :



Carte 29: Prélèvements agricoles à partir de la nappe en 2005

L'examen de cette carte permet d'identifier les secteurs suivants :

- Secteur Ouest le plus exploité (prélèvements et superficies agricoles importantes), regroupant les communes de Guelmim, Laqsabi, Asrir et Taliouine.
- Secteur Nord et Nord-Est ayant une superficie agricole plus faible et des prélèvements importants, avec une forte concentration des terres agricoles dans les communes d'Abaynou, Timoulay et Ifrane Anti Atlas.
- Secteur Sud, représenté par la commune de Fask, à faibles superficies et prélèvements agricoles

### c - La typologie des exploitations agricoles

En reportant sur SIG les superficies de chaque exploitation enquêtée utilisant l'eau souterraine pour l'irrigation, nous déduisons que la taille des exploitations est généralement inférieure à 5 ha sur toute l'étendue de la nappe. Les grandes exploitations sont localisées dans les communes de Laqsabi et Abaynou.

### d - L'intensification agricole

Elle peut être appréciée par le taux d'occupation des principales spéculations pratiquées dans la région et les modes d'irrigation pratiquée:

- Cultures fortes consommatrices en eau : maraîchage (tomate, pastèque) irriguée surtout en localisé (efficacité d'irrigation élevée) et cultures fourragères (maïs grain)



- Cultures moins consommatrices en eau (arboriculture et céréales) et irriguée par immersion ce qui favorise la recharge de la nappe par retours d'irrigation. En effet, ce mode d'irrigation concerne 74% de la superficie totale irriguée par les eaux souterraines.

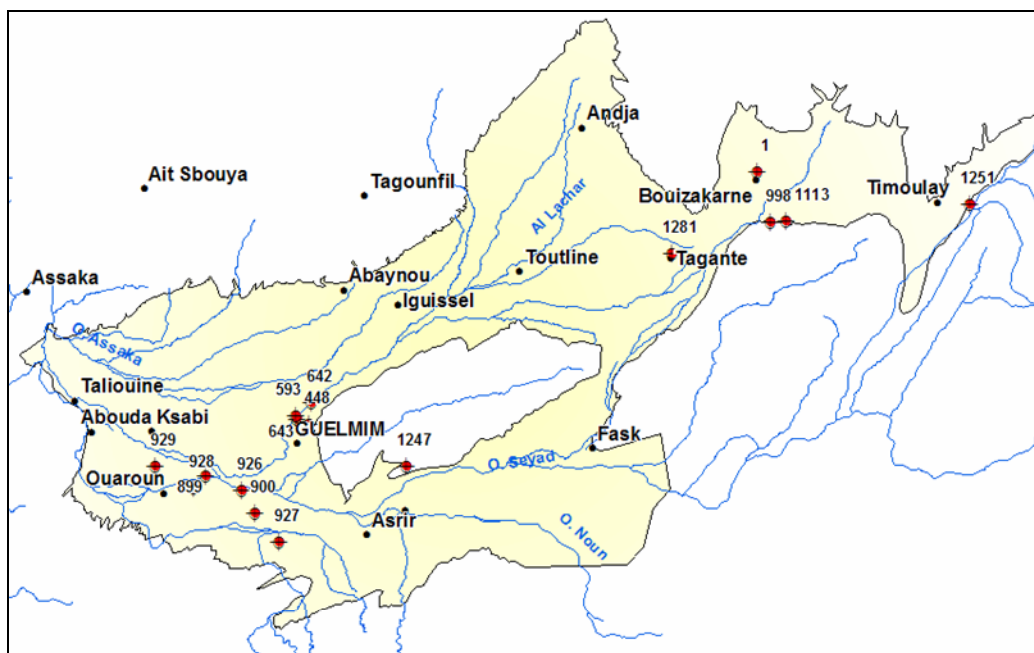
Le croisement de ces paramètres fait ressortir les secteurs suivants :

- Axe liant l'ouest de la commune de Fask à Laqsabi passant par Asrir où se concentre la majorité des exploitations pratiquant le maraîchage irrigué surtout en localisé.
- Secteur N-E est caractérisée par la prépondérance de l'arboriculture (oliviers, figuiers et palmiers dattiers) occupant plus de 75% de la superficie irriguée, et les céréales (25%).
- Secteur Ouest de la nappe + la partie N-W de la commune d'Asrir où sont rencontrés les exploitations cultivant les cultures fourragères.

En conclusion, le secteur Ouest de la nappe, représentés par les communes de Laqsabi, Asrir, Guelmim présente une agriculture très intensifiée.

#### 4.1.2.3 L'alimentation en eau potable

L'alimentation en eau potable des villes de Guelmim et de Tan Tan se fait à partir des deux champs captants d'Oum Al Achar et Seyyad figurant sur la carte suivante :



Carte 30: Situation des captages de l'ONEP

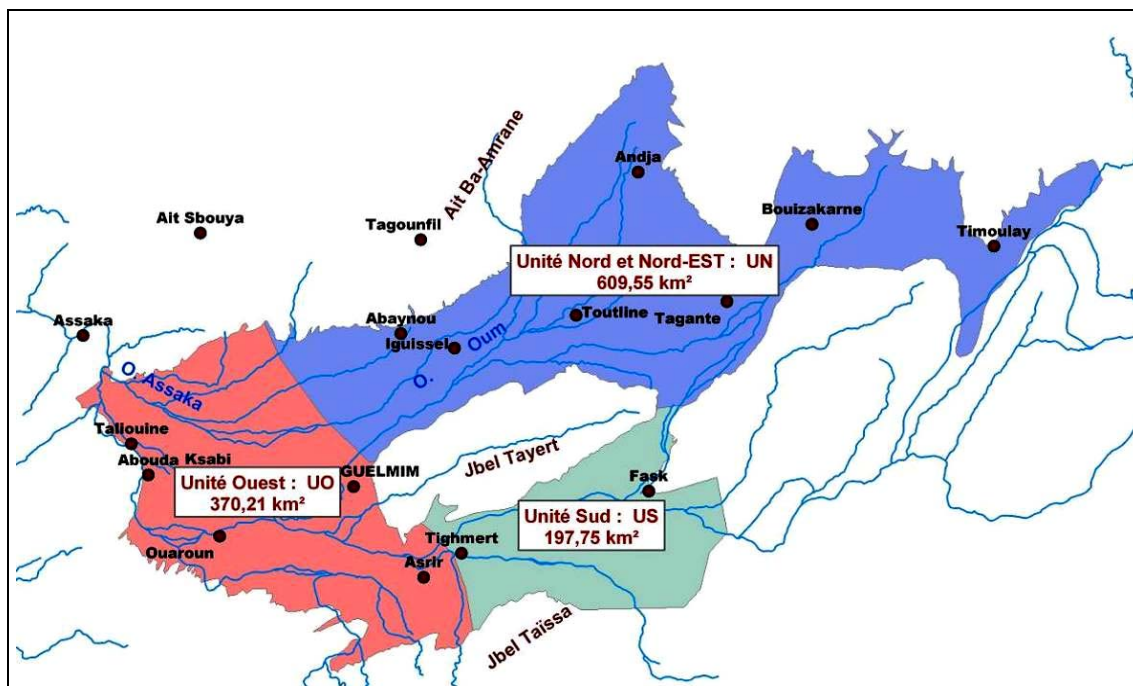
#### 4.1.3. CONCLUSION : DELIMITATION AGRO-HYDROGEOLOGIQUE DE ZONES HOMOGENES DE LA NAPPE DE GUELMIM

Le croisement des différents indicateurs et variables et leur spatialisation à l'intérieur de l'étendue de la nappe de Guelmim nous a permis de faire le zonning suivant :

**Tableau 9 : Zoning de l'étendue de la nappe selon des critères agro-hydrogéologiques**

| Unités homogènes                               | Caractérisation physique (hydrogéologique, hydrologique)  | Caractérisation socio-économique (activité agricole, besoins en eau potable)   |
|--|---|--|
| <b>Unité Nord et Nord-Est de la nappe : UN</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible présence de terres irriguées par épandage</li> <li>- Epaisseur importante de la zone saturée (&gt; à 30 m) et faciès très perméables</li> <li>- Présence d'une zone potentielle pour la recharge depuis Guelmim jusqu'à Andja suivant l'Oued Oum Al Achar</li> <li>- Présence d'apports latéraux et de drainance le long de la bordure N et N-E</li> <li>- Présence de sources d'origine profonde</li> <li>- Perte importante par des sources débitant 3,8 Mm<sup>3</sup>/an, mais compensation par retours d'eau vers la nappe</li> <li>- Bonne qualité de la nappe</li> <li>- Stabilisation du niveau piézométrique, avec une faible baisse au N-E</li> <li>- Possibilités d'exploration des nappes profondes sur la limite S de cette unité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon potentiel agricole</li> <li>- Existence de l'irrigation par épandage des eaux de crue</li> <li>- Forte présence d'oasis irriguées par les eaux de sources au N-E totalisant 1620 ha</li> <li>- Bonne intensification agricole surtout à Abaynou</li> <li>- Prélèvements en eau souterraine importants et forte densité des exploitations surtout à Abaynou</li> <li>- Présence de puits alimentant directement les communes rurales de cette zone en eau potable</li> </ul> |
| <b>Unité Sud de la nappe : US</b>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible présence de terres irriguées par épandage</li> <li>- Zone saturée d'épaisseur moyenne (10 à 30 m) à faciès perméables</li> <li>- Présence d'une petite zone potentielle pour la recharge au N-W de cette unité</li> <li>- Absence d'apports latéraux et de zones de drainance</li> <li>- Faible présence de sources</li> <li>- Bonne qualité de la nappe</li> <li>- Baisse du niveau piézométrique de moins d'1 m / an</li> <li>- Exploration des nappes profondes sur la limite S de cette unité possible mais non faisable à cause de son coût élevé</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible potentiel agricole</li> <li>- Existence de l'irrigation par épandage des eaux de crue</li> <li>- Faible présence d'oasis irriguées par les eaux de sources</li> <li>- Faible intensification agricole</li> <li>- Faibles Prélèvements en eau souterraine et faible densité des exploitations</li> </ul>  |
| <b>Unité Ouest de la nappe : UO</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte présence de terres irriguées par épandage ce qui favorise l'infiltration</li> <li>- Faible épaisseur de la zone saturée (&lt; à 30 m) et faciès peu perméables</li> <li>- Présence d'une zone potentielle pour la recharge au alentour de Guelmim (près du champs captant d'Oum Al Achar</li> <li>- Absence d'apports latéraux et de drainance</li> <li>- Présence de sources débitant 2,3 Mm<sup>3</sup>/an</li> <li>- Perte par évaporation depuis Ouaroun jusqu'à Taliouine et par drainage vers la mer</li> <li>- Problème de salinisation des eaux en aval</li> <li>- Forte baisse des niveaux piézométriques de 0.5 à 2.2 m/an</li> <li>- Possibilité d'exploration des nappes profondes sur la limite N de cette zone</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon potentiel agricole</li> <li>- Développement de l'irrigation par épandage des eaux de crue</li> <li>- Forte présence d'oasis irriguées par les eaux de sources</li> <li>- Bonne intensification agricole surtout entre Asrir, Guelmim et Ksabi</li> <li>- Forts prélèvements en eau souterraine et forte densité des exploitations</li> <li>- Adduction en eau potable par les deux champs captants de Seyyad et Oum Al Achar</li> </ul>                                |

En conclusion, cette analyse typologique a fait ressortir 3 unités à potentialités et vulnérabilité différentes reportés sur la carte ci-dessous:



Carte 31 : Zonning de la nappe suivant l'approche typologique

#### a - Unité UN : partie Nord et Nord-Est de la nappe

Zone de la nappe la plus épaisse, la plus perméable. Sa recharge est améliorée par les apports latéraux au contact des affleurements de calcaires géorgiens des Akhassas, les apports par abouchement souterrain près d'Abaynou et le retour d'eau d'irrigation par les sources s'étalant sur la bordure Nord et Nord-Est de cette unité, ce qui explique une stabilisation des niveaux piézométrique au niveau de ce secteur de la nappe.

Cette unité comporte deux importantes zones qualifiées très potentielles pour la recharge de la nappe, l'une s'étale le long du tracé d'Oued Oum Al Achar et l'autre située en amont du couloir liant Tagant à Fask. Les eaux souterraines de cette unité sont de très bonne qualité vu le sens d'écoulement dirigé vers l'Ouest de la plaine.

Au niveau de la partie Nord-Est de cette unité (communes de Timoulay et d'Ifrane A.A) s'est développée une agriculture typique de la région au niveau des oasis. C'est sur la commune d'Abaynou où une intensification des systèmes de culture se fait sentir. C'est donc l'unité qui représente le plus important potentiel en ressource en eau souterraine de la zone et peut porter secours aux secteurs déficitaires par l'emploi de techniques adéquates.

#### b - Unité UO : partie Ouest de la nappe

Zone de la nappe phréatique la moins épaisse, où la recharge de la nappe se fait essentiellement à partir de l'infiltration des eaux superficielles (au niveau des lits d'oueds) et à par retour d'eaux d'irrigation au niveau des périmètres irrigués et des zones d'épandage d'eau de crue. Les secteurs les

plus productifs de la nappe sont situés le long de l'axe reliant Asrir à Ksabi passant par Guelmim, où un lits fossile parallèle au tracé de l'oued Seyyad a été mis en évidence.

La qualité globale de l'eau de la nappe est généralement bonne dans la partie N-E de cette unité au niveau du champ captant d'Oued Oum AL Achar. Cette qualité se dégrade à l'Ouest en raison de la faible profondeur de la surface de la nappe favorisant l'évaporation de l'eau et donc sa concentration en sels.

Cette unité présente un fort potentiel agricole et tend de plus en plus à une intensification de ces systèmes de cultures. Elle est cependant l'unité la plus sollicitée par les pompages, ce qui explique la forte baisse des niveaux piézométrique durant les dix dernières années. D'autre part, cette partie de la nappe assure l'essentiel des besoins en eau potable des villes de Guelmim et Tan Tan et des communes rurales environnantes grâce aux champs captants de Seyyad et Oum Al Achar.

Sous l'exigence de produire une eau de bonne qualité et en quantité suffisante pour l'AEP en priorité, et face à l'exploitation intense de ces ressources dans le secteur agricole, cette unité est la plus sensible et la plus vulnérable aux risques de salinisation et d'épuisement des réserves en eau souterraine. Et donc des mesures contraignantes de protection contre la surexploitation de cette unité doivent être instaurées. Une zone potentielle de recharge mise en évidence aux environs de Guelmim peut constituer une mesure d'urgence pour pallier au problème de rabattement de la nappe au niveau de cette zone.

### **c - Unité US : partie sud de la nappe**

C'est l'unité qui se trouve en situation intermédiaire des deux autres unités. Elle peut tendre vers une surexploitation de ses ressources si aucune mesure de prévention n'est prise.

## 4.2. ELABORATION DU BILAN HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA NAPPE DE GUELMIM

### 4.2.1. INTRODUCTION

La présente étude propose d'élaborer un modèle simplifié, basé sur le calcul du bilan hydrogéologique de la nappe souterraine. L'établissement d'un tel modèle nous permettra, dans un délai plus court, d'aboutir à des résultats pouvant améliorer la compréhension de la dynamique de la nappe de Guelmim. L'objectif principal étant la compréhension du comportement de la nappe face à un scénario de gestion donné afin de proposer aux gestionnaires un outil permettant de mieux gérer et préserver les ressources en eaux superficielles et souterraines.

#### 4.2.1.1 Qu'est ce qu'un modèle à bilan ?

Un modèle à bilan d'un système aquifère donnée est un modèle de type « boîte noire » dont les entrées sont les débits d'alimentation naturelle supposés connus ; les sorties sont les hauteurs piézométriques et les débits des émergences, les variables de décision qui constitue un facteur social sont les débits extraits ou introduits artificiellement définis par la localisation dans le temps et dans l'espace.

L'utilisation en simulation d'un tel modèle permet de connaître les sorties (exemple la piézométrie) qui seraient consécutives à un ensemble donnée de variables de décisions (pompages ou réinfiltration) si l'on suppose connues les entrées et les paramètres du système aquifère.

#### 4.2.1.2 Pourquoi le choix d'un tel modèle?

- Les objectifs à atteindre ne nécessitent pas la simulation détaillée de l'état du système ;
- La mise en œuvre d'un tel modèle est en général rapide et son calage est assez aisé pour peu que l'on puisse disposer de données en quantité et en qualité suffisantes ;
- Cependant, les inconvénients de tel modèle sont :
- Il est nécessaire de ressembler un historique continu d'entrées et de sorties (au moins pour les sorties)
- Le modèle caractérise un système donné pour un historique d'état donné. Il n'est donc pas transposable à un autre système, même s'il est le siège de phénomènes identiques. Toute prévision ou extrapolation dans le temps au moyen du modèle ne peut être valable que sous l'hypothèse d'une invariance de la structure.

#### 4.2.1.3 Objectifs et méthodologie

Un modèle à bilan est étroitement tributaire de l'état des connaissances au moment de son élaboration. Ainsi, nous avons dans un premier temps réalisé une synthèse et actualisation de toutes les données hydrogéologiques existantes. C'est à la lumière de cette synthèse que nous avons pu identifier à l'intérieur de l'étendue de la nappe de Guelmim des zones ou unités homogènes pouvant constituer des entités à modéliser à part, en se basant sur des critères à la fois hydrogéologiques et socio-économique (caractéristiques hydrodynamiques semblables, même vulnérabilité vis-à-vis de l'exploitation, ...).

Dans ce chapitre, et conformément à la méthodologie développée par Hammani & Bounja (1991) pour le cas de la nappe de Tadla, nous allons procéder au calcul du bilan hydrogéologique détaillé pour chaque unité de la nappe de Guelmim afin de déterminer la contribution de chaque composante dans l'alimentation ou dans le rabattement de la nappe, et d'évaluer sa réserve ainsi que son évolution dans le temps et dans l'espace.

En effet, le calcul du bilan va être fait pour chaque unité homogène identifiée dans le chapitre précédent et à pas de temps mensuel. Pour ce faire, nous calculerons d'une manière détaillée certaines composantes qui ont fait l'objet d'estimation par la DRH (tel que les apports latéraux, les coefficients d'infiltration et l'évaporation à partir de la nappe). Par contre, nous serons appelés à estimer certains paramètres en se référant aux anciens modèles établis.

Selon l'objectif fixé, le bilan sera donc calculé de trois façons différentes:

- Le calcul du bilan annuel sera entrepris dans le but de caler les paramètres estimés en comparant la variation de la réserve calculée par bilan avec celle mesurée.
- le calcul du bilan mensuel pour déterminer séparément chaque composante pouvant contribuer à alimenter ou à rabattre la nappe.

Enfin, nous aboutissons à un modèle traduisant le comportement de l'aquifère face à différents scénarios à simuler: recharge artificielle, nouveaux aménagements, exploitation future de la ressource en eau souterraine.

#### 4.2.2. EQUATION ET SCHEMA GENERAL

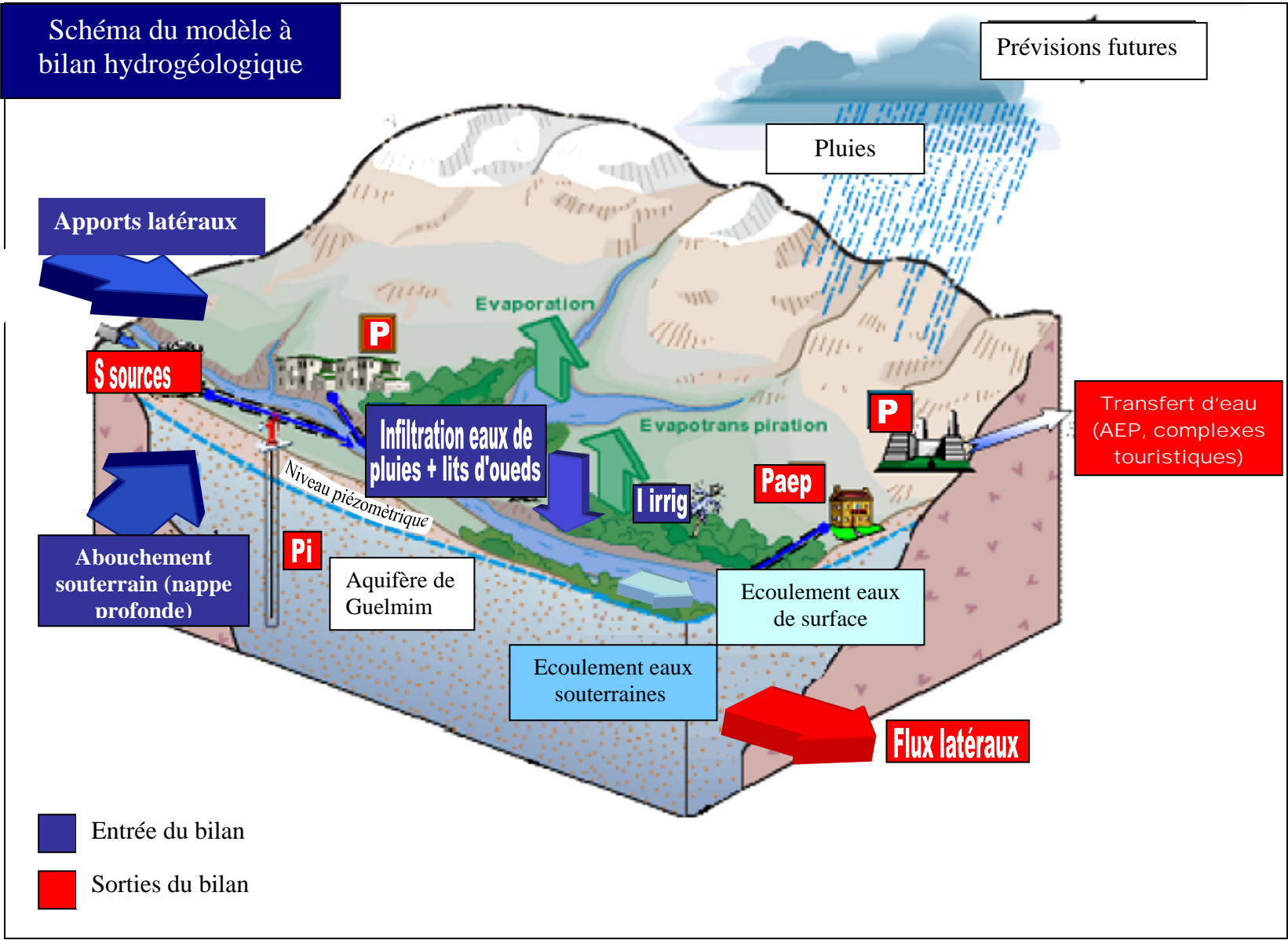
L'équation générale du bilan hydrogéologique de la nappe de Guelmim s'écrit de la façon suivante:

$$I + L + D = P_I + P_{AEP} + S + E_v + E_m + \pm \Delta S$$

Où:

- I : Infiltration efficace (eaux de pluies + lits d'oueds +retours d'eau d'irrigation);
- L : Les apports latéraux à partir de la partie Nord-Est du périmètre;
- D : les apports par abouchement souterrain avec la nappe profonde ;
- Ev : Les prélèvements par l'évaporation directe dans la partie avale de la nappe;
- S : Les prélèvements au niveau des émergences (sources, khattaras);
- Em : l'écoulement vers la mer (au niveau d'Assaka);
- PI : Les prélèvements par pompage privé pour l'irrigation;
- PAEP : Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable;
- ΔS : La variation de la réserve de la nappe.

Pour le calcul du bilan par unité de la nappe, nous allons appliquer les équations suivantes avec  $F_{UX-UY}$  désignant le flux latéral dirigé de l'unité x vers l'unité y:





- Unité Nord et Nord-Est « UN » :

$$I_{UN} + L + D = P_{I(UN)} + P_{AEP(UN)} + S_{UN} + F_{UN-US} + F_{UN-UO} \pm \Delta S_{UN}$$

- Unité Sud « US » :

$$I_{US} + F_{UN-US} = P_{I(US)} + P_{AEP(US)} + S_{US} + F_{US-UO} \pm \Delta S_{US}$$

- Unité Ouest « UO » :

$$I_{UO} + F_{UN-UO} + F_{US-UO} = P_{I(UO)} + P_{AEP(UO)} + S_{UO} + E_m + E_v \pm \Delta S_{UO}$$

Pour les besoins de la reconstitution de l'historique des différents termes du bilan par unité homogène de la nappe, nous avons retenu la période s'étalant de 1989 à 2005 vu l'installation d'un réseau piézométrique à partir de 1985 et la disponibilité de données sur les prélèvements agricoles répartis par commune pour l'année 1989 (enquête de 1989).

### 4.2.3. EVALUATION DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN

C'est l'étape qui nous a pris beaucoup d'efforts et du temps pour pouvoir reconstituer, malgré le manque de données précises, chaque terme du bilan annuellement et mensuellement pour chaque unité de la nappe.

#### 4.2.3.1 Les entrées

##### a - Infiltration

Pour l'estimation de cette composante du bilan hydrogéologique nous avons exploité les résultats de la modélisation hydrologique effectuée par ADI/CACG pour les besoins de l'étude dans laquelle s'insère ce travail. En effet, il s'agit d'un modèle pluie-débit qui permet de reconstituer les écoulements mesurés à partir des pluies enregistrées au pas de temps journalier afin de mieux évaluer l'infiltration, compte tenu du caractère aride de la région étudiée.

Comme le débit observé sur un cours d'eau résulte des précipitations qui sont tombées sur ses bassins hydrologique et hydrogéologique, la relation pluie-débit s'exprime de la manière suivante (AD/CACG, 2006):

- La totalité de la pluie qui tombe sur un bassin (**pluie brute Pb**) ne participe pas directement à l'écoulement. Une partie de cette pluie (notée **Ps**) s'évapore ou est interceptée par la végétation dans le sol. L'autre partie de la pluie (appelé **pluie utile** et noterons **Pu**) va s'infiltrer (**Pi**) ou ruisseler (**Pr**).
- L'eau qui s'infiltré vient recharger la réserve souterraine, alors qu'une partie vient participer à l'écoulement par drainage de la nappe au niveau des lits d'oueds.
- Le calage du modèle pluie-débit a été effectué au niveau des deux seules stations hydrologiques ayant donné lieu à un suivi en continu des écoulements sur des périodes de durée suffisante, les stations de Taghjijt en amont et d'Assaka en aval. Pour notre cas, nous avons exploité les résultats du calage au niveau de la deuxième station.

### **b - Apports latéraux et apports par abouchement souterrain**

On désigne par apports latéraux tout flux d'eau horizontal dirigé vers la nappe et permettant son alimentation naturelle alors que les apports par abouchements sont les flux ascendants de provenance d'une nappe profonde. L'ensemble des cartes piézométriques a mis en évidence une zone d'alimentation par les eaux provenant du plateau des Akhsass au Nord et au Nord-Est et une zone de contact entre la nappe Plioquaternaire et la nappe profonde au Nord d'Abaynou. C'est au long de ces limites que les courbes isopièzes sont parallèles aux bordures et donc le sens d'écoulement est dirigé perpendiculairement vers la nappe.

L'estimation de ces apports a été faite en appliquant la loi de Darcy :  $Q = T.L.\frac{\Delta H}{l}$

Avec :

- Q : débit d'alimentation en l/s ;
- T : la transmissivité moyenne. Elle est de l'ordre de  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s au niveau des deux zones d'apports;
- L : est la longueur de la section à travers laquelle se fait l'écoulement. Mesurée sur la carte piézométrique, elle est de l'ordre de 17000 m le long de la bordure N et N-E et de 6670 m au N d'Abaynou.
- $\frac{\Delta H}{l}$  Est le gradient hydraulique moyen.

Ainsi pour la reconstitution de l'historique annuel des apports, nous avons exploité toutes les mesures disponibles (points de suivis piézométriques, enquêtes réalisées) pour l'élaboration sur Surfer des cartes piézométriques pour les années allant de 1989 à 2005, à partir desquelles nous avons déduit le gradient hydraulique moyen dans les zones d'apport en dressant les cartes de pente de la piézométrie, grâce à l'outil « Calcul de pente » disponible sur Surfer. Ces cartes ont servis pour l'évaluation des différents flux latéraux figurant dans les équations du calcul du bilan par unité.

Ensuite nous avons répartis les volumes annuels pour chaque mois de l'année en appliquant un pourcentage qui traduit l'importance de l'infiltration enregistrée pour ce mois par rapport au total annuel.

#### **4.2.3.2 Les sorties**

Elles se subdivisent en deux catégories :

- Sorties au niveau des exutoires naturels de la nappe
- Prélèvements

##### **a - Les prélèvements par pompage**

###### **i. Pompage privé pour l'irrigation**

La première enquête sur les prélèvements de la nappe de Guelmim a été réalisée en 1976. Elle fait état d'une superficie d'environ 200 ha, qui est irriguée à partir de la nappe, avec un débit de prélèvement de 57 l/s, soit 1.8 millions de m<sup>3</sup> par an.

Une deuxième enquête a été réalisée en 1989. Elle montre que la superficie irriguée a augmenté à 811 ha, avec des prélèvements de 6.62 millions de m<sup>3</sup> par an. Ce qui correspond à un accroissement de 11% par an.

Une troisième enquête a été effectuée en juillet 2005 pour actualiser ces chiffres. Elle montre que le nombre de points d'eau prélevant à partir de la nappe est de 1221 dont 1037 à usage agricole. Mais comme la superficie recensée est inférieure à celle obtenue par l'enquête sur l'irrigation privée de 2002 (1370 ha contre 3780 ha en 2002), nous ne pouvons pas nous fier aux résultats de cette enquête pour l'évaluation des prélèvements actuels. Quant à leur évolution dans le temps, nous avons reconstitué l'historique des superficies irriguées par pompage à partir de l'enquête 2005 puis nous l'avons comparé avec les résultats des anciennes enquêtes et les valeurs déclarés dans les études précédentes. Le tableau suivant récapitule les valeurs obtenues par chaque source de donnée :

**Tableau 10 : Données sur les prélèvements par pompage direct de la nappe selon différents sources**

| Année | Source de donnée                              | Prélèvements en Mm3/an |
|-------|---|------------------------|
| 1989  | Enquête 1989                                  | <b>6,96</b>            |
| 1993  | Etude Wardi, 1999                             | <b>8,51</b>            |
| 1995  | Etude Wardi, 1999                             | <b>9,15</b>            |
| 1998  | Etude Wardi, 1999                             | <b>11,00</b>           |
| 2002  | Enquête irrigation privée avant actualisation | <b>21,54</b>           |
| 2005  | Enquête irrigation privée validé/CT en 2005   | <b>31,21</b>           |

En examinant l'allure obtenue dans le graphique ci-dessous, nous constatons un rapprochement des résultats jusqu'à l'année 2002, ce qui confirme que la superficie a été sous-estimée dans l'enquête 2005 à cause de la méfiance des agriculteurs et leur tendance à déclarer les superficies pratiquées avant 2002.

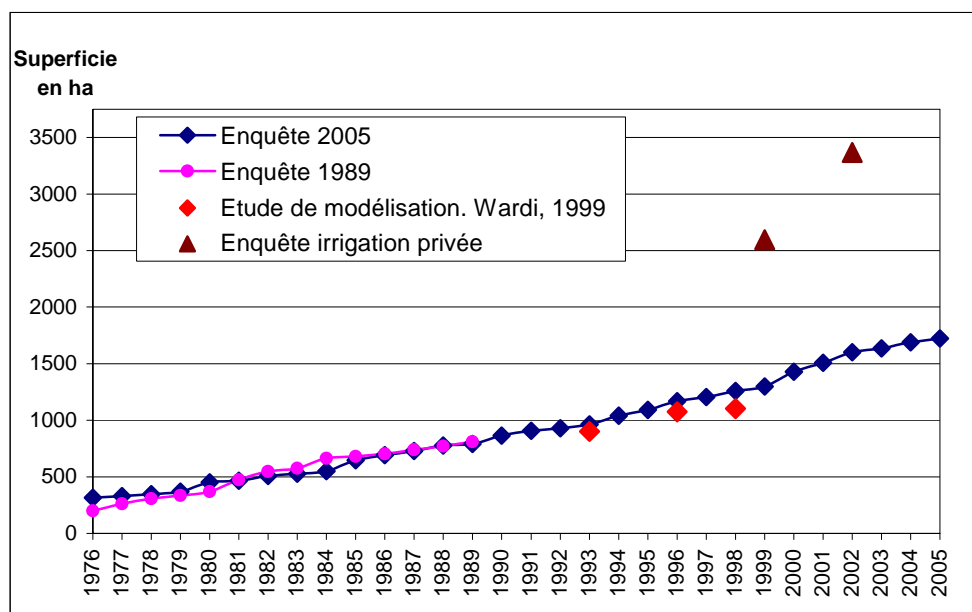


Figure 31 : historique des prélèvements agricoles de la nappe dressé à partir des données et enquêtes disponibles

Ainsi, nous nous sommes basées sur les assolements déclarés en 2002 et validés par les CT de Guelmim pour l'évaluation des volumes prélevés par commune à partir de la nappe en 2005 comme détaillé dans le chapitre précédent (p.91).

Quant à la reconstitution de l'historique annuel des prélèvements et leur répartition par unité homogène, nous avons retenu la période s'étalant de 1989 (date de la deuxième enquête) jusqu'à 2005 puisque avant cette date nous ne disposons pas d'informations sur la répartition spatiale des quantités prélevées comme pour les enquêtes de 1989, de 2002 et de 2005, puis nous avons procédé de la manière suivante:

- Calcul des prélèvements par commune sur la base des assolements obtenus par l'enquête irrigation privée avant son actualisation et leurs affectations à l'année 2002;
- Traçage de la courbe d'évolution des prélèvements agricoles à partir des valeurs obtenues par les enquêtes et études précédentes (Tableau 10).
- Comme la courbe obtenue (voir graphique ci-dessous) s'ajuste bien à une loi exponentielle avec un coefficient de détermination de 92%, nous avons dégagé à partir de l'équation d'ajustement obtenue la formule qui nous permettra de reconstituer l'historique des prélèvements agricoles depuis 1989 jusqu'à 2005 comme suit:

$$\text{Prélèvements (année } n+1) = \text{Prélèvements (année } n) \times e^{0,0963}$$

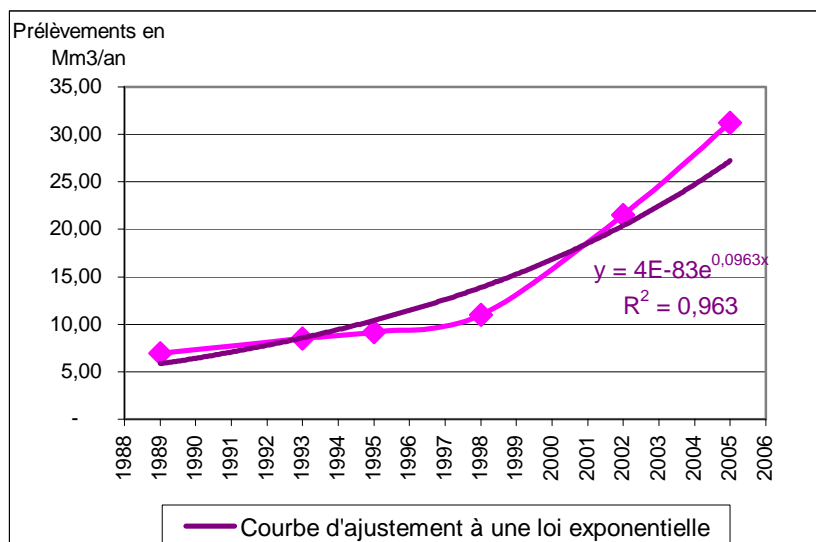


Figure 32 : Graphe de reconstitution de l'historique des prélèvements agricoles par ajustement à une loi exponentielle

En se basant sur l'évolution des prélèvements par commune obtenue par les enquête 1989 et 2005, nous avons pu reconstituer la part de chaque commune dans les prélèvements totaux calculés auparavant pour les années de 1989 à 2005, et ceci en appliquant une loi d'évolution exponentielle pour les communes de Ksabi, Fask, Guelmim, et Asrir, et un accroissement linéaire pour les autres communes. Ensuite nous avons appliqué ces pourcentages pour la reconstitution de l'historique des prélèvements par commune et donc par unité homogène sachant que :

- L'unité Nord et Nord-Est regroupe les communes de Bou Izakarne, Taghjijt, Tagant, Abaynou, Timoulay et Ifrane A.A ;
- L'unité Ouest regroupe les communes de Laqsabi, Guelmim, Asrir et Taliouine ;
- L'unité Sud est représentée par la commune de Fask.

Le détail des calculs est reporté en annexe. Le graphique suivant (Figure 33) récapitule l'historique des prélèvements agricoles par unité homogène.

Pour vérifier la typologie adoptée dans le chapitre précédent pour la caractérisation des unités de point de vue hydrogéologique et socio-économique, nous avons tracé les courbes d'évolution des prélèvements par commune (figures ci-dessous). L'allure des courbes obtenues met en évidence la tendance exponentielle d'accroissement des volumes prélevés à partir de la nappe sur les communes appartenant à l'unité Ouest ce qui confirme la distinction de cette unité comme la plus surexploitée et la plus vulnérable dans la plaine de Guelmim (p.96).

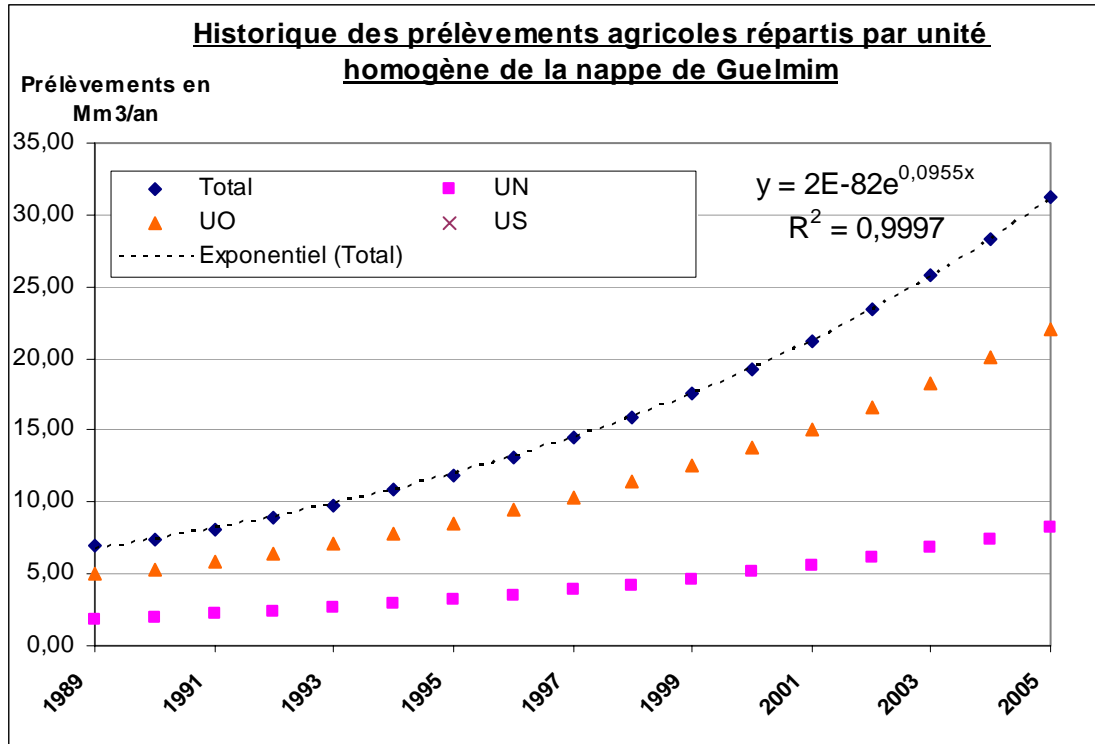
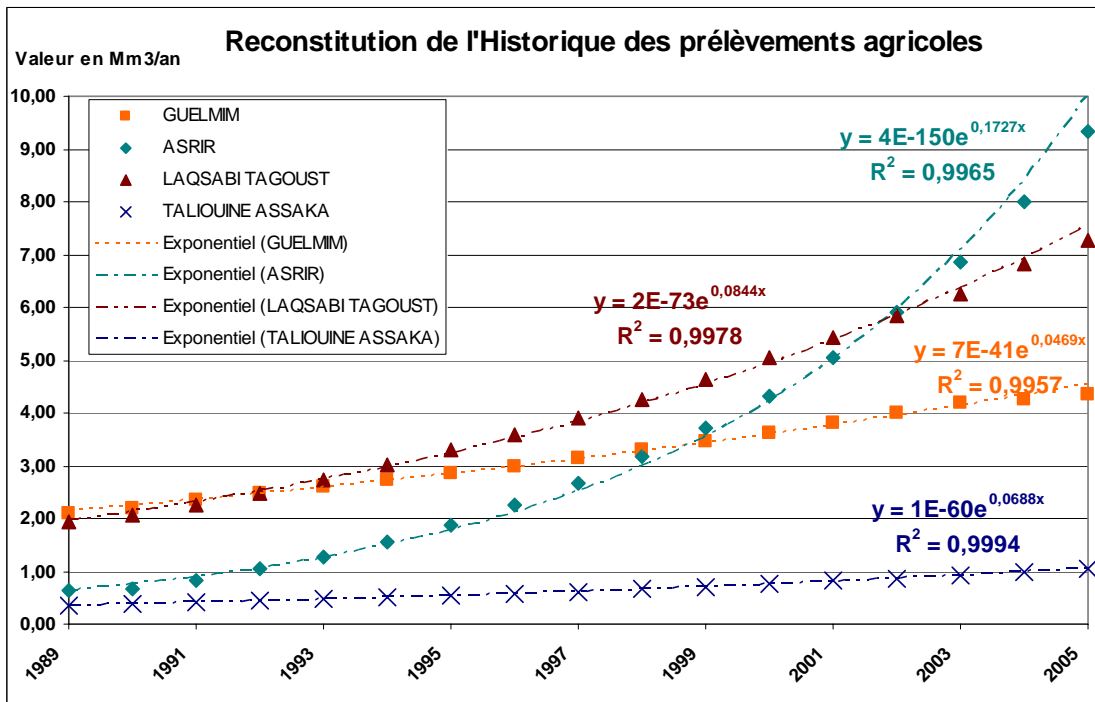
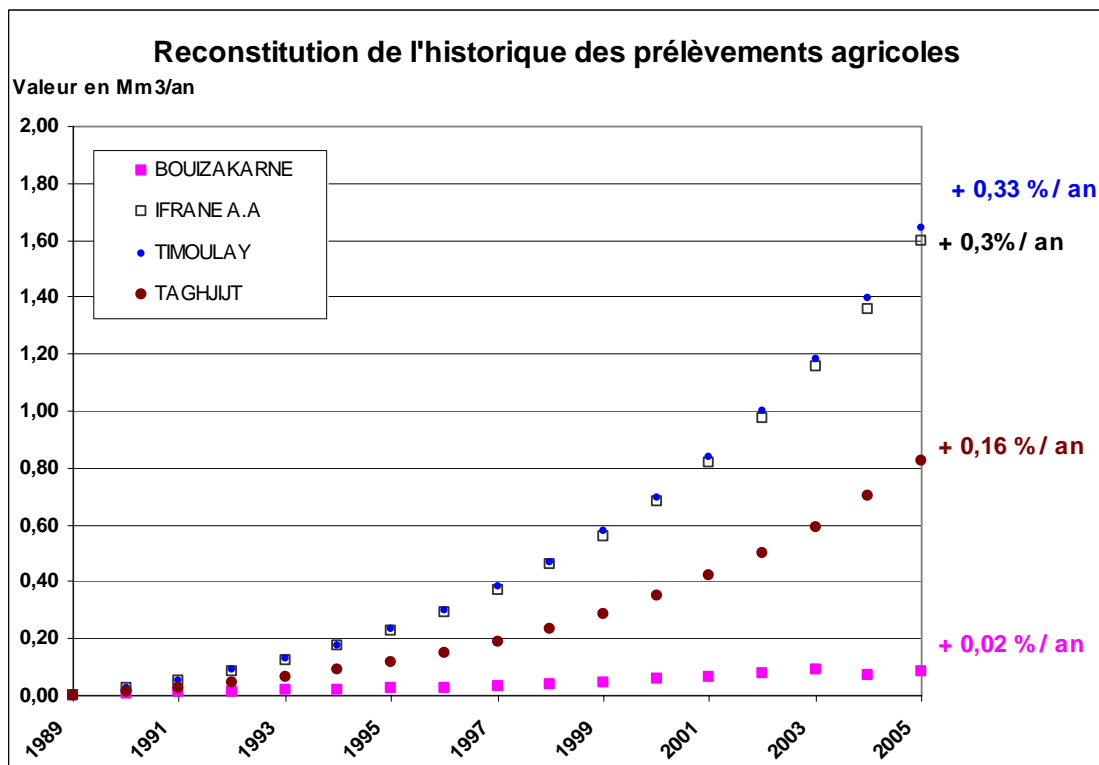
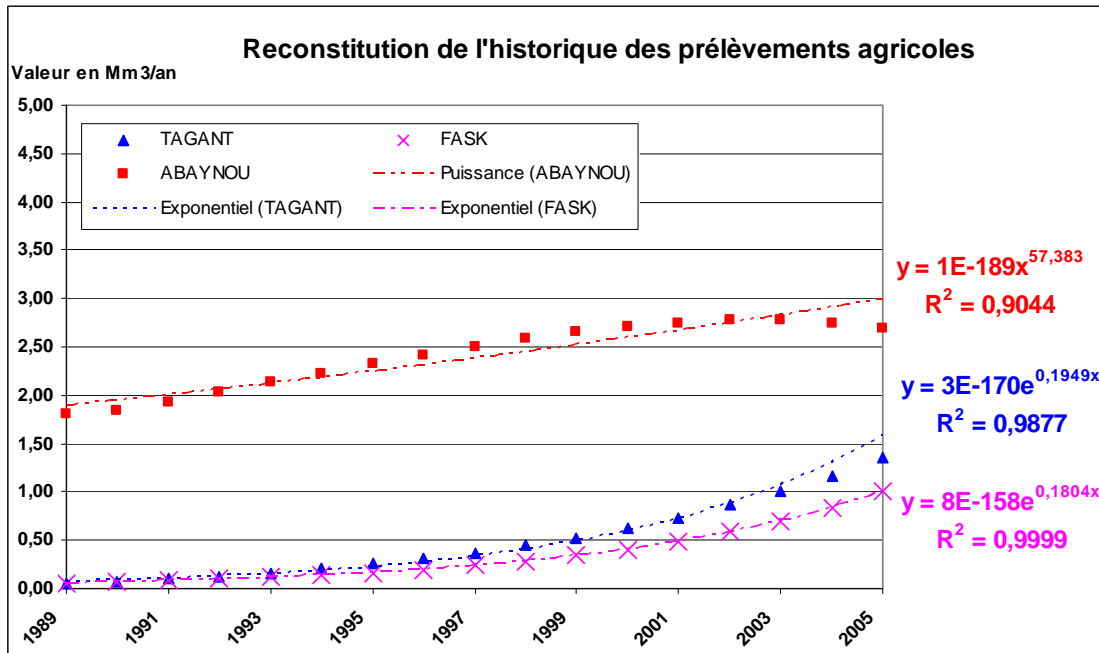


Figure 33 : Historique des prélèvements agricoles répartis par unités homogènes de la nappe de Guelmim





Quant à la répartition des volumes mensuellement, nous nous sommes basées sur la part des besoins en eau de chaque mois par rapport au total annuel en considérant deux assolements différents :



**Tableau 11 : Pourcentages pour la répartition des volumes annuels prélevés de la nappe pour l'irrigation calculés sur la base des besoins en eau de deux assolements différents**

| Mois | % besoins enquête 2005 (basé sur l'assolement pratiqué à partir de 2002) | % besoins avec 6% maraichage et 45% fourrage (pratiqué avant 2002) |
|------|--|--|
| 1    | 0,8%   | 2,0%   |
| 2    | 1,0%   | 1,5%   |
| 3    | 2,4%   | 4,3%   |
| 4    | 4,3%   | 5,5%   |
| 5    | 11,5%  | 9,7%   |
| 6    | 15,5%  | 13,0%  |
| 7    | 22,0%  | 20,0%  |
| 8    | 20,0%  | 19,5%  |
| 9    | 12,0%  | 11,4%  |
| 10   | 8,5%   | 9,1%   |
| 11   | 1,0%   | 2,5%   |
| 12   | 0,9%   | 1,5%   |

## ii. Prélèvements pour l'AEP

L'alimentation en eau potable des centres urbains et des douars de la zone d'études se fait exclusivement à partir des eaux souterraines, par l'intermédiaire de puits et de forages. Ces prélèvements se divisent en deux catégories :

- Les prélèvements effectués par l'ONEP pour l'alimentation des villes de Guelmim et Tan Tan + les centres limitrophes ;
- Les prélèvements par pompage direct de la nappe pour les communes et centres non alimentés par l'ONEP.

Quant à l'estimation de ces prélèvements, nous disposons des données suivantes :

- Situation et production des captages de l'ONEP et nombre des abonnés pour les années 1999 à 2004 ;
- Prélèvements globaux de l'ONEP pour les années de 1989 à 2004 ;
- Résultats du recensement de la population pour les années 1982, 1994 et 2004.

Comme nous devons évaluer les prélèvements par commune et donc par unité de la nappe, nous avons procédé de la manière suivante :

### Répartition des prélèvements de l'ONEP par unité de la nappe

- Calcul de la part de chaque unité en se basant sur la localisation des captages sur la nappe pour les années de 1999 à 2005. les résultats obtenus montrent que l'unité Ouest contribue de 92% dans les prélèvements totaux de 1999 à 2002 puis passe à 88% suite à la réalisation de nouveaux forages dans la zone Nord de la nappe ;

- Application de ce même pourcentage pour les années de 1993 à 2005, en supposant que l'unité ouest assurait l'AEP de la région à 100% avant 1993 ; date de réalisation de nouveaux captages sur Oued Seyyad.

Evaluation des prélèvements de la population rurale (non alimentée par l'ONEP) par unité de la nappe

- Calcul du taux d'accroissement annuel de la population de 1994 à 2005 par commune : Comme nous n'avons pas pu exploiter les statistiques de 1982 à cause du changement du découpage administratif à la fin des années 80, nous avons appliqué ce même taux d'accroissement pour évaluer la population par commune pour les années 1989 à 1993 ;
- Calcul de la population non branchée par commune : en effet, deux cas de figures se présentent :
  - Communes non desservies par l'ONEP et donc toute la population est non branchée
  - Communes alimentés par l'ONEP :
    - Nous avons déduis la population non branchée en multipliant par 6 le nombre d'abonnées fourni par les statistiques de l'ONEP pour les années 1999 à 2005,
    - Nous avons estimé la population non branché pour les communes alimentées avant 1999 en appliquant un coefficient qui traduit le faite que l'évolution des nombres d'abonnées est corrélés avec l'évolution de la production des captages de l'ONEP. Les résultats obtenus par cette approximation sont satisfaisants.
- Calcul des besoins en eau potable de la population non branchée par commune en appliquant une dotation globale de 20 l/habitant/j.

Les volumes annuels obtenus ont été répartis mensuellement en tenant compte d'un coefficient de pointe égale à 1,3 pour les mois de Juillet et Août.

**b - Evaporation directe à partir de la nappe**

L'évaporation de la nappe dans son secteur Ouest qui constitue un terme important du bilan a fait l'objet d'estimations très grossières lors des études antérieures. Nous proposons donc une méthodologie pour l'évaluer. Ainsi, l'étude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim (dans laquelle s'insère ce travail de fin d'étude) propose une nouvelle formule pour son évaluation en se basant sur les résultats de l'étude « l'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride est-elle indépendante de la nature du sol ? » (Coudrain – Risbstein et al, 1992).

À travers l'étude de profils isotopiques dans la zone non saturée pour une dizaine de sols étudiés, Cette dernière étude a fournit une relation applicable en milieu aride où l'évaporation ne dépend que de la profondeur du niveau piézométrique :

$$Q = 205 z^{-1.6}$$

Où : Q est le flux évaporatoire en mm/an et z la profondeur du niveau piézométrique.

Ainsi, nous avons commencé par appliquer cette formule pour évaluer le flux évaporatoire (en mm/an) pour les profondeurs allant de 0 à 10m puis nous avons appliqué la moyenne pour des tranches de profondeur de 0 à 3.3 à 5 et 5 à 10 m. Ce flux par tranche de profondeur a été choisi comme paramètre de calage du modèle.

Pour pouvoir évaluer l'évaporation dans la partie avale de la nappe (unité Ouest), nous devons disposer des superficies correspondantes à chaque tranche de profondeur. Ainsi, nous avons dressés les cartes de profondeur de la nappe / sol à partir des mesures piézométriques disponibles en utilisant le logiciel Surfer qui permet de calculer la surface relative à une profondeur donnée, et ceci pour au moins deux mois par année (Janvier et Juillet) depuis 1989 à 2005. Les valeurs des autres mois ont été estimés par extrapolation en tenant compte de la tendance générale de la nappe (remontée et donc augmentation de l'évaporation et vis versa). En multipliant les superficies obtenues par les flux calculés auparavant, nous déduisons les volumes perdues par évaporation à pas de temps mensuel.

### c - Sources

Lors de l'étude hydrogéologique, nous avons séparé les sources provenant de la nappe plioquaternaire de celles d'origine profonde. Ainsi nous avons considéré les premières une sortie de la nappe en les diminuant de 20% pour tenir compte d'un retour par irrigation, alors que les deuxièmes qui appartiennent en totalité à l'unité N et N-E constituent un apport évalué à 20% de leur volume total vu leur utilisation en irrigation.

### d - Flux aval sortant vers la mer

Comme pour les apports latéraux, la loi de Darcy a été utilisée pour évaluer les sorties latérales de la nappe à l'aval d'Assaka, le long d'un front de 12000 m de longueur. La transmissivité moyenne a été prise égale à  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . la répartition des volumes mensuellement a été faite suivant le même principe adopté pour les apports latéraux.

## 4.2.3.3 Les échanges entre les unités

De la même manière, nous avons appliqué la loi de Darcy pour estimer les flux au niveau des limites séparant entre les unités, le tableau suivant résume les différents termes utilisés :

Tableau 12: Différents termes utilisés pour l'évaluation des flux d'échange entre les unités

| Nature des apports | T en $\text{m}^2/\text{s}$ | Longueur du front d'écoulement |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Flux UN vers US    | 0,02                       | 1500                           |
| Flux UN vers UO    | 0,001                      | 10560                          |
| Flux US vers UO    | 0,003                      | 9100                           |

## 4.2.3.4 La variation de la réserve de la nappe

### a - Méthodes d'approche

La différence entre les entrées et les sorties représente la variation de la réserve de la nappe exprimée par l'évolution de la piézométrie entre le début et la fin de la période considérée. Son évaluation est très importante car elle représente le chiffre-clé pour vérifier la méthode avec laquelle le bilan a été réalisé. Ainsi, nous l'avons calculé de deux manières différentes :

- La première consiste à cartographier la piézométrie pour deux périodes successives puis calculer, en utilisant le logiciel Surfer, le volume par intégration entre les surfaces des deux

périodes considérées. La variation de la réserve pour cette période est obtenue en multipliant ce volume par le coefficient d'emménagement moyen ;

- La deuxième consiste à calculer la différence entre deux relevés piézométriques, puis multiplier cette hauteur par le coefficient d'emménagement et la surface de l'unité considérée pour obtenir le volume de la variation de la réserve.

La première méthode a donnée des résultats très différents de la deuxième à cause de l'imprécision des cartes élaborées à partir des données du suivi piézométrique, due essentiellement à l'insuffisance et la mauvaise répartition des points de mesures. C'est donc la deuxième méthode qui a été retenue pour l'évaluation de la variation des réserves de la nappe.

### **b - Choix des piézomètres de contrôle**

Pour pouvoir reproduire la variation globale de la surface piézométrique pour une unité donnée, nous avons essayé dans un premier temps de sélectionner, parmi tous les piézomètres existants, ceux qui sont les moins influencés par les apports et sorties divers de la nappe, et pouvant donc servir de piézomètres de contrôle. Cependant, en se référant à la carte de situation des piézomètres (Carte 21 p.69), nous constatons que les piézomètres sont soit situés à proximité des lits d'oueds, soit très proche des zones très exploitées pour l'irrigation (Carte 17 p.65). De même quand on compare l'évolution de la piézométrie entre les points de mesures d'une même unité, nous observons différences qui s'expriment par de fortes remontées suite à une crue donnée où de fortes baisses à partir d'une date donnée. Pour pallier à ce problème, nous avons calculé la variation de l'hauteur piézométrique entre deux mois successifs pour tous les piézomètres appartenant à l'unité considérée, en gardant pour un mois donné que les valeurs qui sont de même ordre de grandeur ; La variation de la réserve est prise donc comme égale à la moyenne multiplié par la surface et le coefficient d'emménagement de l'unité considérée.

Ainsi, ce paramètre a été utilisé pour valider le modèle du bilan hydrogéologique en comparant la variation de la réserve obtenue par différence des entrées et des sorties avec celle calculée à partir des mesures obtenues par les piézomètres les plus représentatifs pour chaque mois considéré. La variation annuelle est obtenue en additionnant les valeurs calculées au pas de temps mensuel.

## **4.2.4. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE**

Dans ce paragraphe nous allons présenter les paramètres et résultats du calage des différents termes de bilan.

### **a - Paramètres du calage**

#### **i. Infiltration :**

Nous avons commencé tout d'abord par appliquer des coefficients afin de répartir l'infiltration totale aux différentes unités de la nappe en tenant compte de la nature lithologique de la zone non saturée. Ainsi :

- Les coefficients de l'infiltration de l'unité UN ont été majorés de 40%, vu la nature perméable de la zone non saturée (alluvions et calcaire lacustres karstifiés en partie)

- Ceux de l'unité US ont été diminués de 10% (nature lithologique : marnes sableuses et marnes)

Et donc les coefficients résultants du modèle hydrologique ont été augmentés de 10%.

- Disposant des données mensuelles issues du calage du modèle hydrologique développé par ADI/CACG (pluie brute Pb, évaporation Ps, pluie utile Pu), nous avons ajusté les coefficients d'infiltration vers la nappe par rapport à la pluie utile lors du calage au pas de temps annuel, puis nous avons réévalué l'infiltration totale (= infiltration nappe + drainage nappe/oueds).

#### ii. Apports latéraux et par abouchement et Flux latéraux:

Le paramètre de calage de ces termes est la transmissivité. Les valeurs obtenues sont celles déjà citées auparavant (§ 4.2.3).

#### iii. Alimentation par retour d'eau d'irrigation :

Le paramètre de calage retenu est le coefficient d'infiltration par retour d'eau d'irrigation qui a été évalué à 20% des prélèvements agricoles.

#### iv. Evaporation :

- Le calage consiste à ajuster les valeurs des flux évaporatoires (en mm/an) par tranche de profondeur. Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Tableau 13 : Flux évaporatoire par tranche de profondeur de la nappe par rapport au sol

| Tranche de profondeur | q en mm/an |
|-----------------------|------------|
| 5 < z < 10            | 7,88       |
| 3 < z < 5             | 18,96      |
| z < 3                 | 60,00      |

#### v. Variation de la réserve :

Les valeurs retenues du coefficient d'emménagement pour le calcul de la variation de la réserve sont pour chaque unité : 1.35 % pour l'unité nord UN, 1.6 % pour l'unité sud US et 3.1 % pour l'unité ouest UO.

**b - Présentation des résultats du calage des différents termes du bilan**

La figure suivante illustre un exemple de feuille de calcul du bilan à pas de temps mensuel :

| MOIS         | Infiltration | Flux de l'UN | Prélèvements agricoles | Prélèvements pour l'AEP | sorties / Sources | Flux vers UO | Entrée - Sorties | Variation NP calculée | Variation NP mesurée |
|--------------|--------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| Unité Sud US | Mm3          | Mm3          | Mm3                    | Mm3                     | Mm3               | Mm3          | Mm3              | m                     | m                    |
| janv.-89     | 0,09         | 0,62         | 0,00                   | 0,00                    | 0,14              | 0,74         | -0,17            | -0,09                 | 0,00                 |
| févr.-89     | 0,14         | 0,75         | 0,00                   | 0,00                    | 0,13              | 0,89         | -0,13            | -0,07                 | 0,00                 |
| mars-89      | 0,10         | 0,65         | 0,00                   | 0,00                    | 0,17              | 0,77         | -0,20            | -0,10                 | 0,00                 |
| avr.-89      | 0,08         | 0,59         | 0,00                   | 0,00                    | 0,16              | 0,69         | -0,19            | -0,10                 | 0,00                 |
| mai-89       | 0,00         | 0,40         | 0,00                   | 0,00                    | 0,16              | 0,47         | -0,24            | -0,12                 | -0,05                |
| juin-89      | -            | 0,39         | 0,01                   | 0,00                    | 0,13              | 0,47         | -0,22            | -0,11                 | -0,10                |
| juil.-89     | 0,01         | 0,42         | 0,01                   | 0,00                    | 0,12              | 0,50         | -0,20            | -0,10                 | -0,18                |
| août-89      | 0,05         | 0,51         | 0,01                   | 0,00                    | 0,16              | 0,61         | -0,22            | -0,11                 | -0,27                |
| sept.-89     | 0,00         | 0,40         | 0,01                   | 0,00                    | 0,15              | 0,48         | -0,23            | -0,12                 | -0,12                |
| oct.-89      | 0,04         | 0,49         | 0,00                   | 0,00                    | 0,15              | 0,58         | -0,21            | -0,11                 | -0,08                |
| nov.-89      | 0,29         | 1,11         | 0,00                   | 0,00                    | 0,16              | 1,32         | -0,08            | -0,04                 | -0,03                |
| déc.-89      | 1,08         | 3,12         | 0,00                   | 0,00                    | 0,04              | 3,69         | 0,47             | 0,24                  | 0,16                 |
| janv.-90     | 0,03         | 0,97         | 0,00                   | 0,00                    | 0,16              | 1,12         | -0,29            | -0,14                 | 0,00                 |
| févr.-90     | -            | 0,45         | 0,00                   | 0,00                    | 0,16              | 0,52         | -0,23            | -0,12                 | 0,14                 |
| mars-90      | 0,03         | 0,74         | 0,00                   | 0,00                    | 0,19              | 0,86         | -0,28            | -0,14                 | 0,06                 |

Figure 34: exemple de feuille du calcul du calage du bilan hydrogéologique pour l'unité sud US

Nous avons procédé au calage au pas de temps annuel et mensuel du bilan hydrogéologique de façon à reproduire la variation de la réserve de la nappe mesurée. Compte tenu du sens d'écoulement et des directions des flux d'échange entre les unités, nous avons respecté l'ordre suivant : calage de l'unité nord UN puis l'unité Sud US pour arriver enfin à l'unité ouest UO. Ci-après sont reportés les graphiques d'évolution de la variation de la réserve calculée et mesurée pour chaque unité de la nappe au pas de temps mensuel. Les tableaux suivants récapitulent les résultats de calcul annuel du bilan par unité de la nappe.

Tableau 14: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité nord et nord-est UN

|                      | <b>Infiltration</b> | <b>Apports latéraux</b> | <b>Apport/ abouchement</b> | <b>Prélèvements agricoles</b> | <b>Prélèvements pour l'AEP</b> | <b>sorties / Sources</b> | <b>Flux vers UO</b> | <b>Flux vers US</b> | <b>Entrée - Sorties</b> | <b>Variation de la réserve calculée</b> | <b>Variation de la réserve mesurée</b> |
|----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---|--|
| Année                | <b>Mm3</b>          | <b>Mm3</b>              | <b>Mm3</b>                 | <b>Mm3</b>                    | <b>Mm3</b>                     | <b>Mm3</b>               | <b>Mm3</b>          | <b>Mm3</b>          | <b>Mm3</b>              | <b>Mm3</b>                              | <b>Mm3</b>                             |
| <b>1989</b>          | 5,9                 | 10,2                    | 2,31                       | 1,49                          | 0,20                           | 7,0                      | 5,7                 | 9,5                 | -5,43                   | 193,40                                  | 191,54                                 |
| <b>1990</b>          | 5,9                 | 11,8                    | 2,52                       | 1,58                          | 0,20                           | 7,9                      | 6,7                 | 7,4                 | -3,53                   | 190,86                                  | 187,76                                 |
| <b>1991</b>          | 3,5                 | 10,3                    | 2,10                       | 1,74                          | 0,20                           | 7,9                      | 6,7                 | 7,4                 | -8,05                   | 183,39                                  | 177,90                                 |
| <b>1992</b>          | 0,7                 | 11,3                    | 2,11                       | 1,91                          | 0,20                           | 4,4                      | 3,7                 | 6,6                 | -2,68                   | 180,82                                  | 177,15                                 |
| <b>1993</b>          | 1,4                 | 11,8                    | 2,57                       | 2,10                          | 0,43                           | 4,0                      | 2,3                 | 7,6                 | -0,64                   | 180,41                                  | 177,36                                 |
| <b>1994</b>          | 0,7                 | 10,3                    | 2,10                       | 2,31                          | 0,46                           | 3,3                      | 3,3                 | 9,5                 | -5,77                   | 174,76                                  | 172,86                                 |
| <b>1995</b>          | 3,4                 | 11,8                    | 3,03                       | 2,54                          | 0,45                           | 4,1                      | 3,3                 | 6,6                 | 1,20                    | 176,54                                  | 176,15                                 |
| <b>1996</b>          | 5,5                 | 17,4                    | 3,04                       | 2,80                          | 0,44                           | 7,8                      | 3,3                 | 13,2                | -1,76                   | 175,70                                  | 178,01                                 |
| <b>1997</b>          | 1,6                 | 16,1                    | 2,75                       | 3,08                          | 0,45                           | 4,9                      | 4,3                 | 11,4                | -3,71                   | 172,24                                  | 174,21                                 |
| <b>1998</b>          | 1,9                 | 16,7                    | 2,75                       | 3,38                          | 0,45                           | 4,1                      | 5,3                 | 9,9                 | -1,84                   | 170,71                                  | 171,65                                 |
| <b>1999</b>          | 2,0                 | 15,3                    | 2,75                       | 3,72                          | 0,48                           | 3,0                      | 6,7                 | 10,4                | -4,19                   | 166,85                                  | 168,14                                 |
| <b>2000</b>          | 0,8                 | 13,4                    | 2,53                       | 4,09                          | 0,48                           | 2,6                      | 4,3                 | 7,6                 | -2,32                   | 164,67                                  | 166,89                                 |
| <b>2001</b>          | 1,0                 | 12,3                    | 2,75                       | 4,50                          | 0,47                           | 2,9                      | 4,7                 | 6,0                 | -2,46                   | 162,37                                  | 165,15                                 |
| <b>2002</b>          | 19,7                | 13,9                    | 2,75                       | 4,95                          | 0,47                           | 4,4                      | 5,0                 | 6,8                 | 14,73                   | 180,38                                  | 178,84                                 |
| <b>2003</b>          | 3,3                 | 14,7                    | 2,75                       | 5,44                          | 0,58                           | 2,9                      | 5,1                 | 8,5                 | -1,73                   | 179,21                                  | 178,48                                 |
| <b>2004</b>          | 1,7                 | 13,0                    | 2,53                       | 5,96                          | 0,64                           | 2,9                      | 5,9                 | 8,5                 | -6,69                   | 172,80                                  | 169,19                                 |
| <b>01-05 à 07-05</b> | 1,5                 | 8,5                     | 1,47                       | 3,78                          | 0,37                           | 1,8                      | 2,0                 | 6,0                 | -2,56                   | 170,50                                  | 165,62                                 |



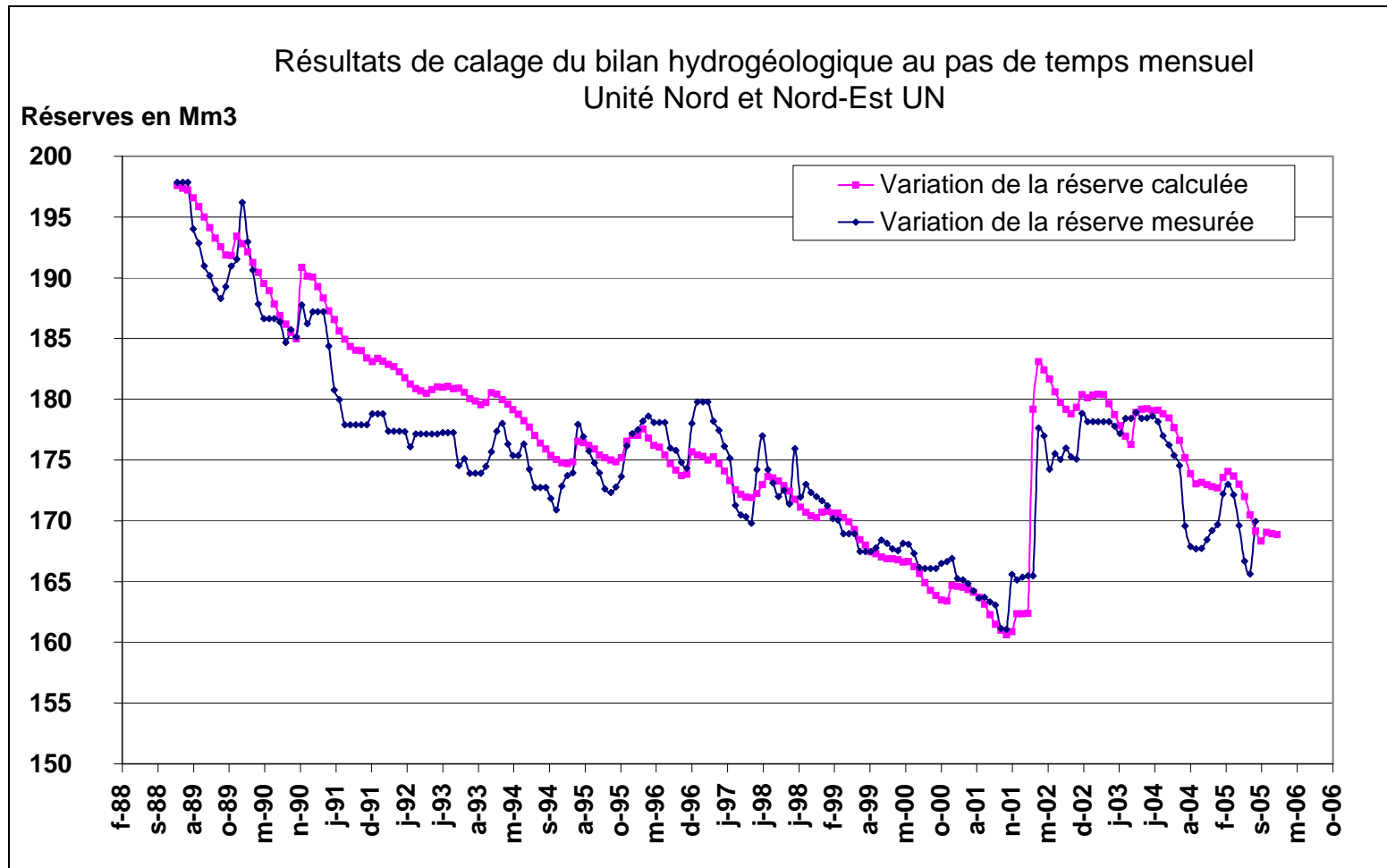


Figure 35 : Graphique illustrant le calage de la variation de la réserve de la nappe calculée par rapport à celle mesurée pour l'unité Nord et Nord-Est UN

Tableau 15: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité Sud US

|                      | <b>Infiltr.</b> | <b>Flux de l'UN</b> | <b>Prélèv. agricoles</b> | <b>Prélèv. pour l'AEP</b> | <b>sorties / Sources</b> | <b>Flux vers UO</b> | <b>Entrée - Sorties</b> | Variation de la réserve calculée | Variation de la réserve mesurée |
|----------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>Année</b>         | <b>Mm3</b>      | <b>Mm3</b>          | <b>Mm3</b>               | <b>Mm3</b>                | <b>Mm3</b>               | <b>Mm3</b>          | <b>Mm3</b>              | <b>Mm3</b>                       | <b>Mm3</b>                      |
| <b>1989</b>          | 1,9             | 9,5                 | 0,0                      | 0,03                      | 1,7                      | 11,2                | -1,61                   | 67,26                            | 67,12                           |
| <b>1990</b>          | 1,9             | 7,4                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,9                      | 8,6                 | -1,26                   | 65,65                            | 65,27                           |
| <b>1991</b>          | 1,1             | 7,4                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,6                      | 6,9                 | -0,04                   | 65,41                            | 65,69                           |
| <b>1992</b>          | 0,2             | 6,6                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,6                      | 6,0                 | -0,90                   | 64,47                            | 63,29                           |
| <b>1993</b>          | 0,4             | 7,6                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,7                      | 6,9                 | -0,66                   | 63,73                            | 61,50                           |
| <b>1994</b>          | 0,2             | 9,5                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,5                      | 8,6                 | -0,56                   | 63,13                            | 59,47                           |
| <b>1995</b>          | 1,1             | 6,6                 | 0,1                      | 0,03                      | 1,2                      | 7,7                 | -1,40                   | 61,53                            | 54,02                           |
| <b>1996</b>          | 1,8             | 13,2                | 0,2                      | 0,03                      | 1,4                      | 12,1                | 1,39                    | 62,59                            | 58,75                           |
| <b>1997</b>          | 0,5             | 11,4                | 0,2                      | 0,03                      | 1,4                      | 10,3                | -0,06                   | 62,44                            | 58,21                           |
| <b>1998</b>          | 0,6             | 9,9                 | 0,2                      | 0,03                      | 1,3                      | 7,7                 | 1,19                    | 63,52                            | 61,42                           |
| <b>1999</b>          | 0,6             | 10,4                | 0,3                      | 0,03                      | 1,1                      | 10,3                | -0,70                   | 62,71                            | 59,66                           |
| <b>2000</b>          | 0,3             | 7,6                 | 0,3                      | 0,02                      | 0,9                      | 6,9                 | -0,29                   | 62,37                            | 58,75                           |
| <b>2001</b>          | 0,3             | 6,0                 | 0,4                      | 0,01                      | 0,7                      | 6,9                 | -1,72                   | 60,60                            | 52,30                           |
| <b>2002</b>          | 6,3             | 6,8                 | 0,5                      | 0,01                      | 0,5                      | 11,2                | 0,97                    | 60,42                            | 54,51                           |
| <b>2003</b>          | 1,1             | 8,5                 | 0,6                      | 0,05                      | 0,4                      | 10,3                | -1,76                   | 58,47                            | 49,40                           |
| <b>2004</b>          | 0,6             | 8,5                 | 0,7                      | 0,07                      | 0,6                      | 8,6                 | -0,84                   | 57,52                            | 46,92                           |
| <b>01-05 à 07-05</b> | 0,5             | 6,0                 | 0,5                      | 0,03                      | 0,3                      | 6,8                 | -1,16                   | 56,27                            | 42,49                           |

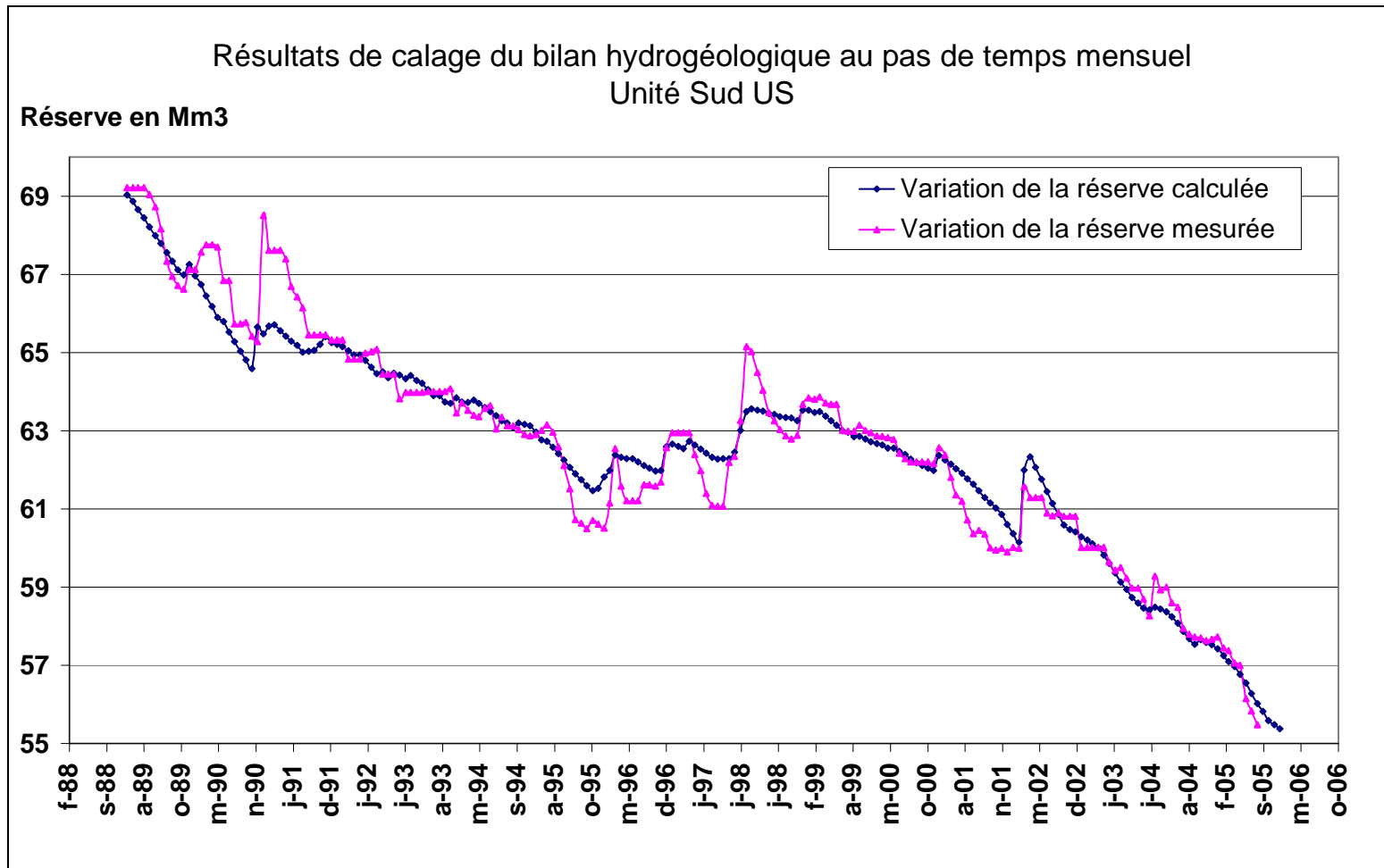


Figure 36 : Graphique illustrant le calage de la variation de la réserve de la nappe calculée par rapport à celle mesurée pour l'unité Sud US

Tableau 16: Résultats du calage du bilan hydrogéologique annuel pour l'unité Ouest UO

|               | Infiltration | Flux de l'UN | Flux de l'US | Prélèvements agricoles | Prélèvements pour l'AEP | sorties / Sources | Evaporation | Sortie à Assaka | Entrée - Sorties | Variation de la réserve calculée | Variation de la réserve mesurée |
|---------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|-----------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Année         | Mm3          | Mm3          | Mm3          | Mm3                    | Mm3                     | Mm3               | Mm3         | Mm3             | Mm3              | Mm3                              | Mm3                             |
| 1989          | 2,9          | 5,7          | 11,2         | 4,0                    | 1,5                     | 0,1               | 11,8        | 9,1             | -6,76            | 139,02                           | 138,78                          |
| 1990          | 2,9          | 6,7          | 8,6          | 4,3                    | 1,5                     | 0,1               | 9,3         | 6,8             | -3,79            | 135,95                           | 136,35                          |
| 1991          | 1,7          | 6,7          | 6,9          | 4,7                    | 2,0                     | 0,1               | 6,7         | 7,6             | -5,68            | 130,70                           | 131,77                          |
| 1992          | 0,3          | 3,7          | 6,0          | 5,2                    | 3,0                     | 0,0               | 7,4         | 6,1             | -11,60           | 119,17                           | 120,06                          |
| 1993          | 0,7          | 2,3          | 6,9          | 5,7                    | 3,0                     | 0,0               | 7,9         | 4,0             | -10,59           | 108,76                           | 108,27                          |
| 1994          | 0,4          | 3,3          | 8,6          | 6,2                    | 3,3                     | 0,0               | 10,5        | 5,3             | -13,05           | 95,80                            | 93,61                           |
| 1995          | 1,7          | 3,3          | 7,7          | 6,9                    | 3,3                     | -                 | 4,8         | 4,0             | -6,13            | 90,09                            | 89,82                           |
| 1996          | 2,7          | 3,3          | 12,1         | 7,5                    | 3,2                     | 0,0               | 7,6         | 1,5             | -1,74            | 89,02                            | 90,06                           |
| 1997          | 0,8          | 4,3          | 10,3         | 8,3                    | 3,3                     | 0,0               | 9,6         | 1,5             | -7,32            | 81,89                            | 82,41                           |
| 1998          | 0,9          | 5,3          | 7,7          | 9,1                    | 3,3                     | -                 | 4,8         | 3,4             | -6,69            | 75,44                            | 74,72                           |
| 1999          | 1,0          | 6,7          | 10,3         | 10,0                   | 3,7                     | -                 | 3,1         | 3,8             | -2,58            | 73,09                            | 73,64                           |
| 2000          | 0,4          | 4,3          | 6,9          | 11,0                   | 3,8                     | -                 | 2,3         | 1,5             | -6,97            | 66,22                            | 65,35                           |
| 2001          | 0,5          | 4,7          | 6,9          | 12,1                   | 3,8                     | -                 | 3,3         | 1,5             | -8,76            | 57,57                            | 55,91                           |
| 2002          | 9,6          | 5,0          | 11,2         | 13,3                   | 4,0                     | -                 | 8,7         | 6,1             | -6,16            | 53,82                            | 49,47                           |
| 2003          | 1,6          | 5,1          | 10,3         | 14,6                   | 4,1                     | -                 | 0,7         | 1,9             | -4,21            | 50,01                            | 45,16                           |
| 2004          | 0,8          | 5,9          | 8,6          | 16,0                   | 4,2                     | -                 | 1,3         | 1,9             | -8,13            | 42,09                            | 37,31                           |
| 01-05 à 07-05 | 0,7          | 2,0          | 6,8          | 10,1                   | 2,6                     | -                 | 2,7         | 1,5             | -7,40            | 34,88                            | 29,11                           |

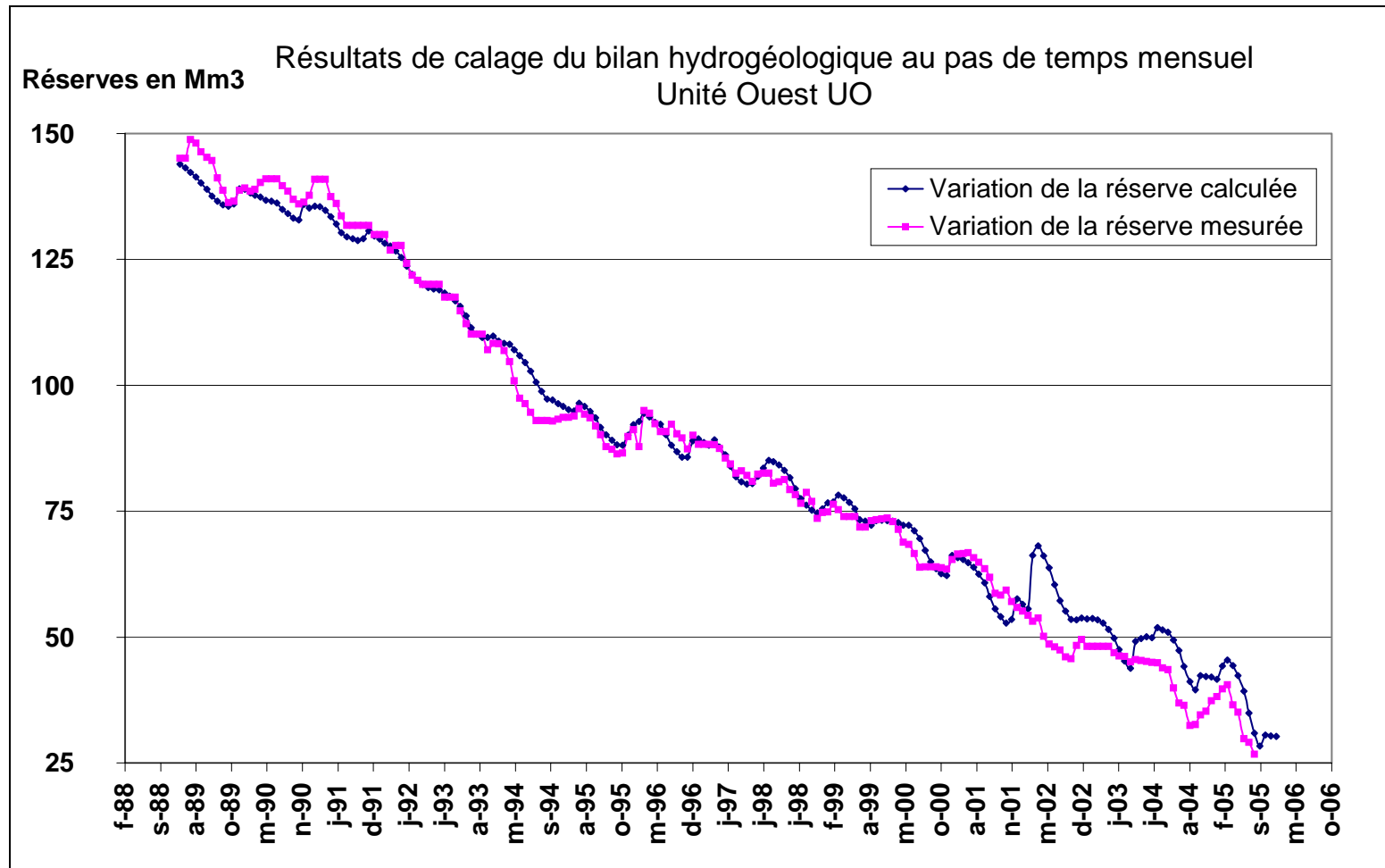


Figure 37 : Graphique illustrant le calage de la variation de la réserve de la nappe calculée par rapport à celle mesurée pour l'unité Ouest UO

## 4.2.5. INTERPRETATION DES RESULTATS

### 4.2.5.1 Comparaison avec les anciens modèles de la nappe

Pour pouvoir juger de la méthode avec laquelle le bilan hydrogéologique a été évalué, nous proposons dans ce paragraphe de comparer les résultats obtenus avec celles issues des études de modélisation antérieures. Pour ce faire, nous avons reconstitué le bilan global de la nappe par sommation des différentes termes et pondération par les superficies et les coefficients d'emmagasinements de chaque unité de la nappe, afin d'évaluer la variation de la réserve exprimée en volume et en hauteur. Les données de la période 07-05 à 12-05 non disponibles initialement ont été complétés par celles de l'année 2004. Le tableau suivant présente donc le bilan hydrogéologique global de la nappe de Guelmim pour la période 1989 à 2005 :

Tableau 17 : Bilan global annuel de la nappe pour la période entre 1989 et 2005

|       | Infiltration | Apports latéraux | Apport/ abouchement | Total entrée | Prélev. agricoles | Prélev. pour l'AEP | sorties / Sources | Evapo | Sortie à Assaka | Total sorties | Entrée - Sorties | Variation de la réserve mesurée |
|-------|--------------|------------------|---------------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------|-----------------|---------------|------------------|---------------------------------|
| Année | l/s          | l/s              | l/s                 | l/s          | l/s               | l/s                | l/s               | l/s   | l/s             | l/s           | l/s              | Mm3                             |
| 1989  | 379          | 323              | 73                  | 776          | 177               | 55                 | 276               | 374   | 288             | 1170          | -395             | 145,59                          |
| 1990  | 383          | 374              | 80                  | 837          | 187               | 56                 | 312               | 295   | 216             | 1066          | -229             | 142,81                          |
| 1991  | 227          | 326              | 67                  | 620          | 206               | 69                 | 305               | 211   | 240             | 1031          | -411             | 137,22                          |
| 1992  | 42           | 359              | 67                  | 468          | 226               | 101                | 190               | 234   | 192             | 945           | -476             | 130,32                          |
| 1993  | 91           | 374              | 81                  | 546          | 249               | 109                | 180               | 249   | 126             | 913           | -367             | 123,78                          |
| 1994  | 47           | 326              | 67                  | 440          | 274               | 121                | 154               | 333   | 168             | 1049          | -609             | 114,12                          |
| 1995  | 223          | 374              | 96                  | 693          | 302               | 119                | 170               | 152   | 126             | 869           | -176             | 112,41                          |
| 1996  | 355          | 551              | 96                  | 1002         | 333               | 116                | 293               | 240   | 48              | 1029          | -27              | 113,76                          |
| 1997  | 100          | 510              | 87                  | 698          | 366               | 120                | 199               | 304   | 48              | 1038          | -340             | 108,33                          |
| 1998  | 122          | 530              | 87                  | 740          | 404               | 120                | 173               | 154   | 108             | 959           | -219             | 103,78                          |
| 1999  | 126          | 486              | 87                  | 700          | 444               | 133                | 129               | 97    | 120             | 922           | -223             | 101,83                          |
| 2000  | 53           | 425              | 80                  | 559          | 489               | 135                | 111               | 73    | 48              | 857           | -298             | 96,82                           |
| 2001  | 62           | 391              | 87                  | 540          | 538               | 136                | 114               | 106   | 48              | 943           | -403             | 90,29                           |
| 2002  | 1273         | 442              | 87                  | 1802         | 593               | 141                | 155               | 274   | 192             | 1356          | 446              | 91,51                           |
| 2003  | 216          | 468              | 87                  | 771          | 653               | 150                | 104               | 23    | 60              | 991           | -220             | 88,37                           |
| 2004  | 111          | 411              | 80                  | 603          | 719               | 156                | 111               | 42    | 60              | 1087          | -484             | 80,81                           |
| 2005  | 162          | 411              | 80                  | 653          | 990               | 165                | 123               | 42    | 60              | 1379          | -726             | 75,82                           |

La comparaison porte sur les termes suivants :

#### a - Infiltration

Pour une pluviométrie moyenne évaluée à 95 mm/an pour la période de 1989 à 2004 :

- L'évaporation présente 91% de la pluie brute soit 86 mm/an ;
- La pluie efficace représente en moyenne 8% de la pluie brute, répartie comme suit :
- 31% part en ruissellement soit 3,8 mm en moyenne;
- 69% représente l'infiltration dont 65% réellement la nappe alors qu'en moyenne 4% rejoint le ruissellement par drainage de la nappe au niveau des lits d'oueds.

L'infiltration vers la nappe représente en moyenne 5.4 % de la pluie brute (57% de la pluie utile) soit 5mm/an, réparti entre 6.2 % pour l'unité nord et nord-est UN, 4.2% pour l'unité ouest UO et 5.7% pour l'unité sud US.

Lors des modélisations précédentes, le coefficient d'infiltration a été évalué à 22% par Dijon (1963), à 12 à 15% par la DRH (synthèse des connaissances hydrogéologiques sur la région de Guelmim, 1982), et 6% soit 7.32 mm/an comme recharge globale par Agoussine (1993). Cette dernière valeur s'approche de celle obtenue par le présent modèle.

Pour l'année 1996, le plan directeur d'aménagement des ressources en eau des bassins sud-atlasiques (SOGREAH/SCET, 1996) a évalué la recharge par les eaux de pluies à 252 l/s et par épandage à 81 l/s, soit une recharge globale de 333 l/s, valeur proche de celle calculé par notre modèle à bilan (335 l/s). Pour l'année 1999, l'infiltration évaluée par Wardi (1999) est de 216 l/s contre 118 l/s retenu par le modèle.

### **b - Apports latéraux et par abouchement**

Les apports par abouchement avec la nappe profonde sont de l'ordre de 67 à 97 l/s comparés à 70 l/s évalués par les modélisations précédentes et 110 l/s obtenue par le modèle de Wardi (1999).

Les valeurs des apports latéraux obtenues varient selon l'hydraulicité de l'année de 323 à 551 l/s. Ils ont été évalués à 326 l/s en 1996 (SOGREAH/SCET Maroc, Juin 1996) et à 307 l/s en 1999 (Wardi, 1999), alors que dans la thèse d'Agoussine (1993), ce terme a été estimé à 233 l/s. la différence constatée pour les années pluvieuses peut être expliquée par le fait que ce flux est augmenté lors des crues par infiltration directe de la pluie dans les cheminements karstiques des calcaires géorgiens bordant la limite Nord et Nord-Est du bassin.

### **c - Evaporation dans le secteur aval de la nappe**

De l'examen du tableau ci-dessous, nous constatons que les résultats obtenus sont différents de celles évalués dans les études antérieures. Comme la nappe a connu un rabattement continu surtout pour les dix dernières années, les surfaces d'évaporation ont considérablement diminué ce qui en découle une diminution de la lame d'eau évaporée par rapport aux modélisations précédentes.

Tableau 18 : comparaison des valeurs de la lame d'eau évaporée dans le secteur aval de la nappe obtenues par différents modèles

| Année de calcul du bilan | Modèles antérieurs                        | Q évaporé (l/s) |                            |
|--------------------------|---|-----------------|----------------------------|
|                          |   |                 | Bilan de la présente étude |
| 1989                     | Agoussine, Avr 93                         | 180             | 374                        |
| 1996                     | Plan Directeur SOGREAH – SCET Maroc, 1998 | 328             | 240                        |
| 1999                     | Wardi, Mai 99                             | 264             | 97                         |



#### **d - Flux sortant à Assaka**

Ce terme a été évalué entre 73 à 213 l/s lors de modélisations précédentes. Ces valeurs s'approchent de celles évalués par la présente étude pour la période entre 1989 et 2000. Pour les 5 dernières années ce flux a diminué à cause du développement des pompages agricoles en aval de la nappe pour atteindre 48 l/s sauf pour le cas de l'année hydrologique 2002-2003 qui a connu une crue exceptionnelle.

#### **4.2.5.2 Analyse de l'historique des différents termes du bilan**

- Tendances générale de la nappe :
  - Remontée générale de la nappe est enregistrée surtout à UN ;
  - Réponse différée dans le temps : UN se charge en premier, passe une grande partie à US puis un peu moins à UO, US livre un débit à UO qui voit son NP augmenter.
- Total des sorties :
  - > 30 Mm<sup>3</sup>/an en moy ;
  - Max de 37 à 42 Mm<sup>3</sup>/an pour les années hydrologiquement favorables à cause de l'augmentation des sorties par évaporation et par déversement vers la mer ;
  - Augmentation des prélèvements pour l'AEP et pour l'irrigation.
- Total des entrées : recharge totale :
  - En moyenne 22,9 Mm<sup>3</sup>/an ;
  - Max 30 en 1996 et 52 en 2002.
- Part de l'infiltration dans le total des apports :
  - 10 à 43 % des apports en année normale ;
  - 33 à 68 % en année favorable.
- Part des sorties par les exutoires naturelles (évaporation, sources, flux aval) par rapport au sorties totales :
  - > 52 % jusqu'à 1997 ;
  - Entre 20 % et 46 % de 1998 à 2003 ;
  - < 20 % pour les deux dernières années.
- Infiltration globale (recharge par pluie et par épandage des eaux de crue) :
  - < 2,5 Mm<sup>3</sup>/an pour la période 1992-1995 et en 2001 ;
  - Entre 2,5 et 5 Mm<sup>3</sup>/an : période 1997-2000 et en 2004 ;
  - Entre 5 et 8 Mm<sup>3</sup>/an : 1995, 2003 et 2005 ;
  - Entre 8 et 11 Mm<sup>3</sup>/an : 1989, 1990 et 1996 ;
  - Maximum enregistré en 2002 : 27 Mm<sup>3</sup>/an.

– Flux :

| Flux latéraux         | Année normale (en Mm3/an) | année favorable (en Mm3/an) |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| De UN vers UO         | 3 à 7                     |                             |
| De UN vers US         | 6 à 11                    | 13                          |
| De US vers UO         | 7 à 10                    | 11 à 12                     |
| Flux aval vers Assaka | 1 à 5                     | 8 à 10                      |

- L'unité nord fait transiter plus de débit vers la branche entre Fask et Jbel Tayert que vers l'ouest, et même le débit véhiculé par l'US est supérieur à celui livré par l'UN. Ceci peut être expliqué par la transmissivité qui est :
  - 20 fois supérieures au Nord de Fask par rapport à celles mesurée sur la limite UN-UO ;
  - 3 fois supérieure à la limite séparent US à UO qu'au niveau de la limite séparant UN à US.
- Apports latéraux : 10 à 13 Mm3/an en année normale (moyenne 13 Mm3/an soit 412 Mm3/an). Maximum 14 à 17 Mm3/an.
- Apports par abouchement souterrain : entre 67 et 96 l/s.

#### 4.2.6. CONCLUSION

Nous avons pu, à travers ce modèle simplifié basé sur le calcul détaillé du bilan hydrogéologique, reproduire l'évolution de la surface piézométrique de la nappe de Guelmim. En reconstituant l'historique des différentes entrées et sorties de l'aquifère, nous pouvons juger de l'effet de chaque composante du bilan dans le rabattement ou la recharge de la nappe. C'est ainsi que nous proposons d'exploiter, dans la dernière partie de ce rapport, le modèle élaboré pour mieux comprendre le comportement de la nappe face à une situation donnée et dégager des règles optimales de gestion des ressources en eau souterraines du bassin de Guelmim.

## **CHAPITRE 5. ELABORATION D'UN OUTIL DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU « MODELE OGERE »**

### **5.1. INTRODUCTION**

Actuellement, le Maroc est soumis à de nombreux débats quant aux modes de gestion des ressources en eau. Etant conscients de la problématique actuelle et souhaitant savoir quels pourraient être les outils permettant à une agence de bassin de *gérer et de protéger les ressources en eaux souterraines à l'échelle régionale*, nous proposons au terme de cette étude d'élaborer un outil de gestion simplifié qui nous permettra, dans un court délai, de tester certains plans d'action quant à l'allocation des eaux souterraines et aux scénarios d'aménagements.

En effet, la modélisation est une méthode qui est passée de mode en matière de gestion des ressources en eau. Il est vrai que les modèles que l'on a tenté de produire, il y a de cela vingt ou trente ans, prétendaient assurer la traduction mathématique de situations complexes, avec une multitude de paramètres, dont certains ne se prêtaient pas au chiffrage. Les résultats n'étaient pas convaincants. Avec une ville pré-saharienne telle que Guelmim, nous avons affaire à un problème complètement différent. La problématique est réduite à sa plus simple expression : quelle est la meilleure utilisation de l'eau ? Tout tourne autour d'un seul chiffre : la disponibilité en eau. Aménager la plaine de Guelmim, c'est avant tout dire précisément comment on compte utiliser les litres/seconde disponibles, en disant combien de litres on affecte à telle ou telle activité, et comment on compte procéder pour en optimiser l'utilisation.

Ainsi, nous avons pu développer une nouvelle méthodologie, en s'inspirant de celle adoptée dans l'étude intitulée « stratégie d'aménagement et de développement des oasis au Maroc » - troisième phase : « stratégie de développement et plans d'actions » (Dirassat, 2003) pour l'élaboration du modèle d'optimisation de l'utilisation des ressources hydrauliques mobilisables (OURHI) pour chaque espace oasien du Maroc en l'occurrence la région de Guelmim.

Par ailleurs, il faut signaler que le résultat recherché par un tel modèle n'est, en aucun cas, de fournir une solution unique et précise au problème considéré. Il s'agit tout simplement de tester un outil de réflexion qui permet de vérifier la cohérence des propositions avec les contraintes et les paramètres considérés. L'objectif final est d'offrir aux gestionnaires un outil de réflexion permettant d'apporter des réponses réalistes et suffisantes pour une meilleure gestion des ressources en eaux superficielles et souterraines.

### **5.2. OBJECTIFS**

L'objectif de l'outil proposé est d'optimiser l'exploitation des ressources en eau effectivement disponibles. Le paramètre clé est la quantité d'eau mise à la disposition des différents usagers. La gestion durable des ressources en eau consiste donc à déterminer quelle serait la quantité d'eau mise à disposition des différentes catégories d'utilisateurs, puis proposer des mesures pour maximiser l'efficacité de ces dotations, c'est pour cela que nous l'avons appelé modèle d'« **O**ptimisation de la **G**estion des **R**essources en **E**au ».

Dans le cas de la région de Guelmim, la nappe phréatique constitue la principale ressource en eau mobilisée pour la satisfaction des besoins en eau potable en premier lieu et agricole en second lieu. Le bilan hydrogéologique de cette nappe a montré qu'elle se trouve en situation déficitaire depuis plusieurs années, ce qui s'est manifesté par une diminution du niveau piézométrique pouvant atteindre 1 à 2 m dans certaines régions. Une gestion optimale de cette ressource passe par le rétablissement de son équilibre à travers des techniques de recharges et des aménagements appropriés.

Ainsi, nous tenterons d'évaluer l'impact des aménagements proposés par le PDAIRE de 1996 sur la nappe de Guelmim en priorité et sur l'environnement socio-économique et naturel de la région d'une manière globale.

### **5.3. ARCHITECTURE DU MODELE ET ETAPES DE SA CONSTRUCTION**

Comme la nappe souterraine constitue la principale source à gérer, l'architecture du modèle s'appuie essentiellement sur le calcul de son bilan hydrogéologique par unité homogène. La figure suivante (

Figure 38) illustre cette architecture et les principales étapes de sa construction. En effet, nous devons fournir comme données d'entrée deux informations clés pour chaque aménagement proposé :

- L'infiltration supplémentaire vers la nappe souterraine ;
- Les superficies d'épandage supplémentaires.

Ainsi, le modèle permet de déterminer pour chaque scénario testé et par unité de la nappe:

- 1- La consommation en eau agricole maximale : en se fixant préalablement un objectif de recharge annuelle par unité de la nappe, nous calculons par l'établissement du bilan hydrogéologique la consommation en eau agricole maximale pour chaque unité, sachant que les besoins en eau potable doivent être satisfaits en premier lieu.
- 2- Les superficies agricoles irriguées à partir de la nappe par type d'assolement : Connaissant la valeur ajoutée pour chaque type d'assolement, nous déterminons la superficie accordée à chaque assolement de façon à maximiser la valeur ajoutée totale, sous contrainte que la consommation totale calculée par l'estimation des besoins en eau agricole soit égale à celle évaluée auparavant afin de respecter l'objectif de recharge souhaité. Il s'agit d'un problème d'optimisation simplifié où la valeur ajoutée représente la fonction à maximiser, les superficies de chaque assolement sont les variables de décision, et la consommation en eau maximale permise (et donc indirectement la recharge imposée) représente la contrainte à respecter.

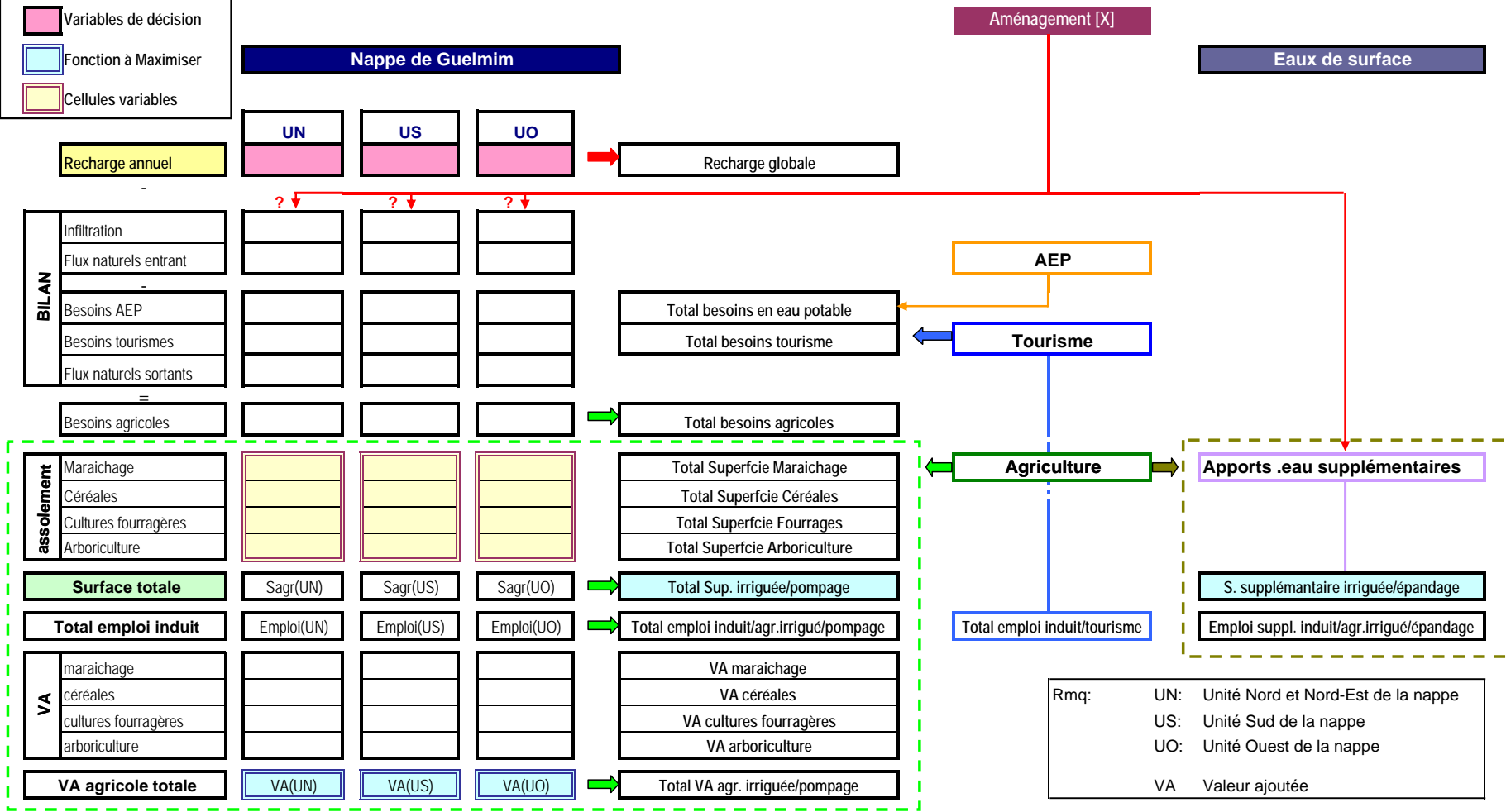
Notons que pour le calcul de l'assolement optimal à pratiquer dans chaque unité de la nappe, nous avons fixé la superficie de l'arboriculture à sa valeur actuelle. Aussi nous avons introduit des contraintes sur les superficies maximales de maraîchage et celles minimales pour les autres cultures vu que la solution de départ tend à maximiser les premières à cause de leur haute valeur ajoutée.

- 3- La valeur ajoutée pour l'agriculture irriguée par pompage de la nappe ;
- 4- L'emploi agricole total (épandage + pompage) : nous déduisons la superficie totale qui, multipliée par un coefficient d'induction spécifique, donne l'emploi induit par l'agriculture irriguée par pompage de la nappe et par épandage des eaux de surface.

# Architecture du modèle "OGERE"

**Légende**

- Agr. Irriguée/pompage
- Agr. Irriguée/épandage
- Variables de décision
- Fonction à Maximiser
- Cellules variables



Pour chaque scénario d'aménagement, nous effectuons les opérations (de 1 à 4) pour l'année 2005 et pour les horizons de 2015 et 2025 pour tenir compte du degré de la satisfaction des besoins en eau potable croissants. Le calcul est effectué sous Excel® en utilisant pour la résolution du problème d'optimisation l'outil « Solveur » comme illustré dans les figures suivantes :

|                                       | Q                    | R                    | S      | T      | U       | V       | W           | X | Y | Z | AA | AB |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|--------|---------|---------|-------------|---|---|---|----|----|
| <b>Nappe de Guelmim</b>               |                      |                      |        |        |         |         |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      |                      |        | UN     | US      | UO      | Total nappe |   |   |   |    |    |
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>       | Infiltration globale |        | 2,8    | 4,3     | 1,9     | 9,0         |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | flux entrant         |        | 15,2   | 7,0     | 13,5    | 35,7        |   |   |   |    |    |
|                                       | <b>sorties</b>       | Besoins AEP          |        | 0,8    | 0,3     | 5,8     |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Flux sortants        |        | 14,8   | 9,0     | 3,5     |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Consommation en eau  |        | 2,1    | 0,7     | 7,1     |             |   |   |   |    |    |
|                                       | Recharge annuel en m |                      | 0,09   | 0,12   | 0,21    |         |             |   |   |   |    |    |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>assolement</b>    | Consommation en eau  |        | 2,1    | 0,7     | 7,1     |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Maraichage           |        | 0,0    | 10,0    | 152,2   |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Céréales             |        | 17,7   | 44,8    | 100,0   |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Cultures fourragères |        | 5,0    | 5,0     | 200,0   |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Arboriculture        |        | 300    | 34      | 580     |             |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | Surface totale en Ha |        | 322,7  | 93,8    | 1032,2  |             |   |   |   |    |    |
|                                       | <b>MB</b>            | maraichage           |        | 0      | 122500  | 1865062 | 1967562     |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | céréales             |        | 30149  | 76392   | 170500  | 277041      |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | cultures fourragères |        | 3675   | 3675    | 147000  | 154350      |   |   |   |    |    |
|                                       |                      | arboriculture        |        | 408000 | 46240   | 788800  | 1243040     |   |   |   |    |    |
| VA agricole totale (DH)               |                      |                      | 441824 | 248807 | 2971362 | 3661994 |             |   |   |   |    |    |
|                                       | Total emploi induit  |                      | 484    | 141    | 1548    | 2173    |             |   |   |   |    |    |

Figure 39: Exemple de l'utilisation du solveur Excel® dans le modèle OGERE

## 5.4. PARAMETRES DU MODELE

En se référant à la méthodologie détaillée dans le paragraphe précédent, nous pouvons déduire que les paramètres requis par le modèle OGERE sont de plusieurs types:

- Paramètres hydrogéologiques : à savoir les différents termes du bilan hydrogéologique et les caractéristiques de chaque unité de la nappe (étendue et coefficient d'emmagasinement pour le calcul de la recharge) ;
- Paramètres agronomiques et socio-économiques : besoins en eau et valeur ajoutée par type d'assolement ; besoins en eau potable pour différents horizons.

### 5.4.1. PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

Les différents termes du bilan ont été déduits de l'analyse de leur historique effectuée dans le 4<sup>ème</sup> chapitre du présent rapport traitant le bilan hydrogéologique de la nappe de Guelmim pour la période de 1989 à 2005. En effet, mise à part l'évaporation et le flux sortant vers Assaka qui ont été figés à leur valeur actuelle (étant largement inférieure à celles enregistrée pour les années précédentes) afin de limiter les sorties de la nappe surtout dans sa partie avale qui connaît un rabattement considérable,

nous avons retenues pour les autres termes les valeurs obtenues pour une année normale. Le tableau suivant récapitule les différents paramètres hydrogéologiques utilisés par le modèle :

**Tableau 19 : Paramètres hydrogéologiques utilisés dans le modèle OGERE**

|  | <b>Nappe</b> | <b>UN</b> | <b>US</b> | <b>UO</b> |
|--|--------------|-----------|-----------|-----------|
| Superficie (Km <sup>2</sup> )            | 1177,51      | 565,3     | 414,46    | 197,75    |
| Coefficient d'emménagement               | 1,8%         | 1,2%      | 3,0%      | 1,0%      |
| Infiltration moyenne (Mm <sup>3</sup> )  | 5            | 2,4       | 1,8       | 0,8       |
| Apports latéraux (Mm <sup>3</sup> )      | 13           | 13        |           |           |
| Apports / abouchement                    | 2,2          | 2,2       |           |           |
| Flux de l'UN à US (Mm <sup>3</sup> )     | 7            |           |           |           |
| Flux de l'UN à UO (Mm <sup>3</sup> )     | 5            |           |           |           |
| Flux de l'US à UO (Mm <sup>3</sup> )     | 8,5          |           |           |           |
| Flux aval vers Assaka (Mm <sup>3</sup> ) | 2            |           |           | 2         |
| Sources (Mm <sup>3</sup> )               | 3,28         | 2,8       | 0,48      | 0         |
| Evaporation (Mm <sup>3</sup> )           | 1,5          |           |           | 1,5       |

L'objectif de recharge annuelle de la nappe qui sera imposé pour les différents scénarios d'aménagement est de 3 à 4 Mm<sup>3</sup>/an (soit une remontée globale de la nappe de 0,1 à 0,2 m/an), en considérant une remontée sensible du niveau piézométrique pour les unités nord et sud, et une recharge de 6.5 Mm<sup>3</sup>/an pour l'unité ouest qui connaît une baisse importante du niveau piézométrique ces dernières années.

## 5.4.2. PARAMETRES SOCIO-ECONOMIQUES

### a - Besoins en eau agricole par assolement

Ils ont été déterminés à partir du calcul des besoins en eau des cultures effectuées dans la le cadre de la présente étude (voir annexe) en préconisant une reconversion de l'irrigation gravitaire en localisée pour les cultures fortes consommatrices en eau à savoir les cultures maraîchères et fourragères.

**Tableau 20: Besoins en eau moyen en m<sup>3</sup>/ha pour chaque assolement**

|                      |      |
|----------------------|------|
| Maraîchage           | 8000 |
| Cultures fourragères | 7000 |
| Céréales             | 8200 |
| Arboriculture        | 6400 |

### b - Emploi induit par l'activité agricole

Ce paramètre a été évalué en considérant un coefficient de 0,5 emplois/ha/an pour l'agriculture irriguée par épandage, et un coefficient de 1,5 emplois/ha/an pour l'agriculture irriguée par pompage de la nappe (Dirasset, 2003).



### c - Valeur ajoutée agricole par type d'assolement

Il s'agit des valeurs obtenues de l'étude intitulée « assistance technique pour la réalisation des études à des ouvrages principaux du périmètre d'épandage des eaux de crues Igharghar, CR Timoulay Province de Guelmim »- ADI, 2005.

Tableau 21: Valeur ajoutée agricole en DH / ha pour différents types d'assolement

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Maraîchage           | 12250 |
| Cultures fourragères | 1705  |
| Céréales             | 735   |
| Arboriculture        | 1360  |

### d - Besoins en eau potable projetés pour les centres et villes alimentés à partir de la nappe de Guelmim

En se référant aux résultats de l'étude de la demande en eau potable de la plaine de Guelmim réalisée par ADI en 2006, les besoins en eau potable vont passer de 165 l/s en 2005 à 176 l/s en 2015 et à 220 l/s en 2020. 84% de ces besoins sont assurés par les captages d'Oum Al Achar et Seyyad appartenant à l'unité Ouest de la nappe. Le reste (16%) représente les prélèvements directs effectués par la population rurale.

## 5.5. IDENTIFICATION DES VARIANTES D'AMENAGEMENT

En se référant au schéma d'aménagement proposé par le plan directeur d'aménagement des ressources en eau de l'unité de Guelmim (SCET/SOGREAH, 1996), nous avons retenu 3 scénarios pour les tester par le modèle OGERE (voir Carte 32). Il s'agit de :

- Réalisation du barrage Fask seul qui a pour fonctions l'écrêtement des crues, la protection contre les inondations et la recharge de la nappe
- Réalisation du barrage Fask plus des ouvrages de dérivations de crue proposés par le plan directeur mais non encore réalisés
- Réalisation du barrage de stockage Assaka qui a pour fonction de limiter les débits perdus en mer estimé à 36 Mm<sup>3</sup>/an.

Pour chaque scénario identifié, nous nous limiterons dans ce qui suit à une présentation des données nécessaires au modèle (une description plus détaillée de ces ouvrages a fait l'objet du premier chapitre de ce rapport §1.3).

### 5.5.1. BARRAGE FASK

Situé à l'amont de la ville de Fask sur l'oued Seyyad, ce barrage va permettre un gain de 11,4 Mm<sup>3</sup> en volume dérivé et une augmentation de la superficie d'épandage de 4600 ha, la superficie totale dominée étant égale à 13200 ha dont 8600 ha desservis par les seuils de dérivation existants.

Comme la recharge de la nappe se fera par épandage naturel, l'infiltration supplémentaire vers la nappe a été évaluée à 0.5 m<sup>3</sup>/j/ha pour une perméabilité de l'ordre de 10<sup>-4</sup> m/s (Nejjarou, 2006), soit 2,4 Mm<sup>3</sup> à l'intérieur des périmètres d'épandage appartenant à l'unité Sud (13200 ha), et à 10% du volume restant (11,4 – 2,4) soit 0.9 Mm<sup>3</sup> par infiltration dans les lit d'oueds de l'unité Ouest de la

nappe (en supposant une amélioration du coefficient de l'infiltration globale qui n'est que de 6%). donc la recharge totale sera de 3.5 Mm<sup>3</sup>/an de plus que celle évalué actuellement à 5 Mm<sup>3</sup>/an soit 8.5 Mm<sup>3</sup>/an . Le coût global du barrage s'élève à 390 MDH.

### **5.5.2. BARRAGE FASK + BARRAGES DE DERIVATION DES EAUX DE CRUE**

En effet, le plan directeur prévoit, en plus de la construction du barrage Fask, la réalisation de nouveaux ouvrages de dérivation de crue. Ce sont ceux qui ne sont pas encore réalisés qui ont été retenus pour cette analyse. Il s'agit de :

- 2 barrages d'écrêtement de crue situés dans le périmètre d'Oum Al Achar (Tlat Ntramt et N'Gouli) qui permettrons de gagner 0,4 Mm<sup>3</sup> comme volume dérivé et 0.04 Mm<sup>3</sup> comme infiltration supplémentaire vers la nappe (en tenant compte d'un coefficient d'infiltration de 10%) pour un coût de 7.57 MDH ;
- 4 nouveaux barrages de dérivation des crues (Ida Oulgane, Id Iaaza, Ikkem et Asrassar) qui, pour un coût global de 22,6 MDH, vont permettre le développement de 2765 ha en épandage, et une infiltration de 0.25 Mm<sup>3</sup> vers la nappe.

### **5.5.3. BARRAGE ASSAKA**

Situé sur l'oued Assaka à 20 km au Nord-Ouest de la ville de Guelmim, ce barrage réservoir n'aura aucun effet sur l'exploitation ou la recharge de la nappe de Guelmim. En effet, les études technico-économiques établies ont montré que sa faisabilité n'est pas justifiée dans les conditions économiques actuelles. Cependant, après la sélection du projet touristique au site de la plage blanche dans le cadre de la stratégie de développement touristique au Maroc, le barrage Assaka est considéré dans le cadre du plan de développement intégré de la région de Guelmim-Es-Smara comme projet stratégique le plus prioritaire de la région. En effet, il pourra constituer la solution la plus économique pour l'alimentation en eau du projet touristique de la plage blanche.

Pour tenir compte de ce dernier point, il a fallu connaître l'emploi induit par l'activité touristique. Comme nous n'avons pas pu disposer de cette information, nous nous sommes contentés du calcul de l'emploi agricole induit par le périmètre qui sera créé juste à son amont ayant une superficie de 1500 ha (SCET/SOGREAH, 1996).

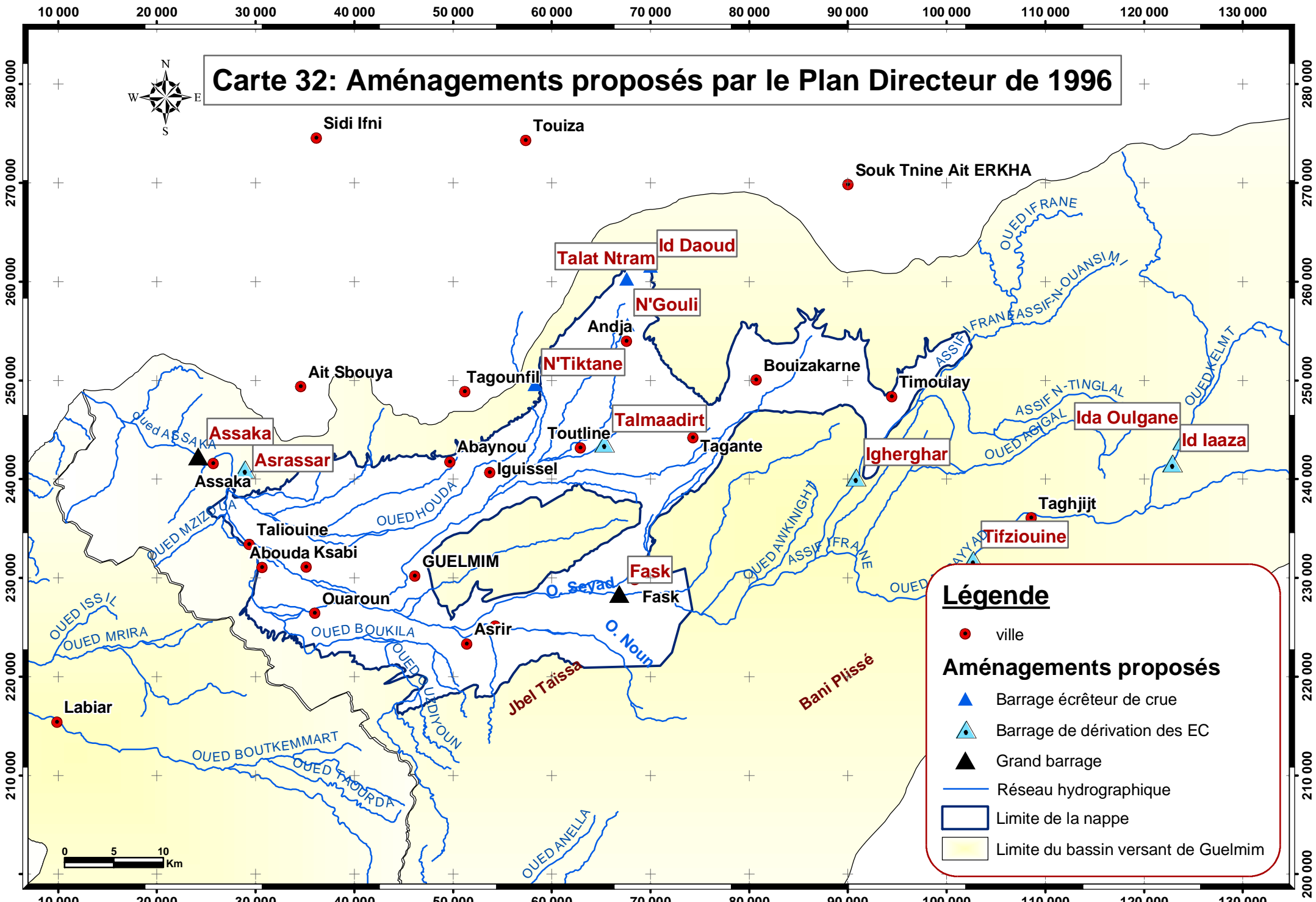
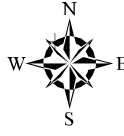
Le coût du projet englobe, en plus du coût d'investissement évalué à 651 MDH, un coût supplémentaire pour la réalisation de la station de pompage qui alimentera le nouveau périmètre créé par refoulement évalué à 195 MDH/an.

## **5.6. RESULTATS DE L'EXPLOITATION DU MODELE OGERE**

### **5.6.1. ETAT DE REFERENCE (SANS AMENAGEMENT REALISE)**

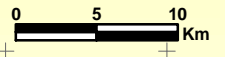
Pour pouvoir juger de l'effet des aménagements proposés sur l'amélioration de l'exploitation des ressources en eau souterraines et le développement socio-économique de la région, nous avons commencé par appliquer le modèle sur l'état de référence (situation sans aménagement) afin de déterminer, pour le même objectif de recharge testé par les autres scénarios d'aménagement, quel doivent être les assolements pratiquées pour chaque unité de la nappe.

# Carte 32: Aménagements proposés par le Plan Directeur de 1996



**Légende**

- ville
- ▲ Barrage écriêteur de crue
- ▲ Barrage de dérivation des EC
- ▲ Grand barrage
- Réseau hydrographique
- Limite de la nappe
- Limite du bassin versant de Guelmim



Nous avons effectué le calcul pour 3 horizons : à l'état actuel (2005), à 2015 et à 2025 pour tenir compte de l'évolution des besoins en eau potable à assurer par la nappe de Guelmim en premier lieu. Comme le montrent les tableaux ci-dessous, la recharge maximale que nous avons pu atteindre n'est que de 1.5 Mm<sup>3</sup>, donc la superficie agricole irriguée à partir de la nappe ne doit pas dépasser 1411 ha alors que nous observons le développement de 3500 ha à l'état actuel. Cette superficie doit encore diminuer pour atteindre en 2025 environ 1167 ha. Quant à la répartition spatiale de ces superficies sur l'étendue de la nappe, nous constatons que même si nous ramenons les prélèvements agricoles dans l'unité Sud US à zéro, cette zone de la nappe continuera à être déficitaire de 1.1 Mm<sup>3</sup>/an. Pour le cas des deux autres unités, seulement 347 ha (1063 ha) sont tolérés pour la zone Nord (UN) et ouest (UO) respectivement.

L'assolement à pratiquer dans les régions nord de la nappe est essentiellement basé sur l'arboriculture (plus de 85%). Pour la zone Ouest de la nappe, nous avons obtenu pour l'année 2005 un assolement de 14% de maraîchage, idem pour les céréales, 17% pour les cultures fourragères et 62% pour l'arboriculture. Pour les horizons futures, la part des cultures maraîchères et fourragères doit diminuer car la consommation agricole diminue face à l'accroissement des besoins en eau potable pour ne représenter que 14% de l'assolement à pratiquer dans la région de Guelmim.

**Tableau 22 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet) à l'état actuel**

|                                       |                                |                      | UN          | US         | UO         | Total nappe |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>                 | Infiltration globale | 2,4         | 1,8        | 0,8        | 5,0         |
|                                       |                                | flux entrant         | 15,2        | 7,0        | 13,5       | 35,7        |
|                                       | <b>sorties</b>                 | Besoins AEP          | 0,6         | 0,1        | 4,5        | 5,2         |
|                                       |                                | Flux sortants        | 14,8        | 9,0        | 3,5        | 27,3        |
|                                       |                                | Consommation en eau  | <b>2,30</b> | <b>0,0</b> | <b>7,4</b> | 9,7         |
|                                       | <b>Recharge annuelle en m</b>  |                      | 0,05        | -0,02      | 0,20       | 0,05        |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>Assolement en ha</b>        | Maraîchage           | 0,0         | 0,0        | 150,0      | 150,0       |
|                                       |                                | Céréales             | 42,1        | 0,0        | 153,7      | 195,8       |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 5,0         | 0,0        | 180,0      | 185,0       |
|                                       |                                | Arboriculture        | 300         | 0          | 580        | 880,0       |
|                                       | <b>Surface totale</b>          |                      | 347,1       | 0,0        | 1063,7     | 1410,8      |
|                                       | <b>VA en DH</b>                | Maraîchage           | 0           | 0          | 1837500    | 1837500     |
|                                       |                                | Céréales             | 71735       | 0          | 262108     | 333843      |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 3675        | 0          | 132300     | 135975      |
|                                       |                                | Arboriculture        | 408000      | 0          | 788800     | 1196800     |
|                                       | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 483410      | 0          | 3020708    | 3504118     |
|                                       | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 521         | 0          | 1596       | 2116        |

Tableau 23 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet ) à l'horizon 2015

|                                |                                | UN                   | US          | UO         | Total nappe |         |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|---------|
| Bilan hydrogéologique          | entrées                        | Infiltration globale | 2,4         | 1,8        | 0,8         | 5,0     |
|                                |                                | flux entrant         | 15,2        | 7,0        | 13,5        | 35,7    |
|                                | sorties                        | Besoins AEP          | 0,7         | 0,2        | 4,7         | 5,5     |
|                                |                                | Flux sortants        | 14,8        | 9,0        | 3,5         | 27,3    |
|                                |                                | Consommation en eau  | <b>2,25</b> | <b>0,0</b> | <b>7,2</b>  | 9,5     |
|                                | <b>Recharge annuel en m</b>    |                      | 0,05        | -0,04      | 0,2         | 0,05    |
| Agriculture irriguée / pompage | Assolement en ha               | Maraîchage           | 0,0         | 0,0        | 150,0       | 150,0   |
|                                |                                | Céréales             | 36,6        | 0,0        | 150,0       | 186,6   |
|                                |                                | Cultures fourragères | 5,0         | 0,0        | 151,1       | 156,1   |
|                                |                                | Arboriculture        | 300         | 0          | 580         | 880,0   |
|                                | <b>Surface totale</b>          |                      | 341,6       | 0,0        | 1031,1      | 1372,7  |
|                                | VA en DH                       | Maraîchage           | 0           | 0          | 1837500     | 1837500 |
|                                |                                | Céréales             | 62362       | 0          | 255750      | 318112  |
|                                |                                | Cultures fourragères | 3675        | 0          | 111090      | 114765  |
|                                |                                | Arboriculture        | 408000      | 0          | 788800      | 1196800 |
|                                | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 474037      | 0          | 2993140     | 3467177 |
|                                | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 512         | 0          | 1547        | 2059    |

Tableau 24 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour la situation (sans projet ) à l'horizon 2025

|                                |                                | UN                   | US         | UO         | Total nappe |         |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------|------------|-------------|---------|
| Bilan hydrogéologique          | entrées                        | Infiltration globale | 2,4        | 1,8        | 0,8         | 5,0     |
|                                |                                | flux entrant         | 15,2       | 7,0        | 13,5        | 35,7    |
|                                | sorties                        | Besoins AEP          | 0,8        | 0,3        | 5,8         | 7,0     |
|                                |                                | Flux sortants        | 14,8       | 9,0        | 3,5         | 27,3    |
|                                |                                | Consommation en eau  | <b>2,1</b> | <b>0,0</b> | <b>5,8</b>  | 7,9     |
|                                | <b>Recharge annuelle en m</b>  |                      | 0,04       | -0,04      | 0,18        | 0,04    |
| Agriculture irriguée / pompage | Assolement en ha               | Maraîchage           | 0,0        | 0,0        | 100,0       | 100,0   |
|                                |                                | Céréales             | 17,7       | 0,0        | 114,4       | 132,1   |
|                                |                                | Cultures fourragères | 5,0        | 0,0        | 50,0        | 55,0    |
|                                |                                | Arboriculture        | 300        | 0          | 580         | 880,0   |
|                                | <b>Surface totale</b>          |                      | 322,7      | 0,0        | 844,4       | 1167,1  |
|                                | VA en DH                       | Maraîchage           | 0          | 0          | 1225000     | 1225000 |
|                                |                                | Céréales             | 30149      | 0          | 195035      | 225185  |
|                                |                                | Cultures fourragères | 3675       | 0          | 36750       | 40425   |
|                                |                                | Arboriculture        | 408000     | 0          | 788800      | 1196800 |
|                                | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 441824     | 0          | 2245585     | 2687410 |
|                                | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 484        | 0          | 1267        | 1751    |

### 5.6.2. SCENARIOS D'AMENAGEMENT

Nous avons répété les mêmes opérations effectuées dans le cas de la situation de référence pour chaque scénario proposé. Le détail du calcul de l'affectation des ressources en eau souterraine pour chaque scénario est reporté dans les tableaux qui suivent. Notons que pour le 3<sup>ème</sup> scénario (barrage

Assaka), les résultats sont les mêmes que ceux obtenus à l'état de référence en ce qui concerne l'exploitation de la nappe de Guelmim.

Tableau 25 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à l'état actuel

|                                       |                               |                                | UN          | US         | UO         | Total nappe |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>                | Infiltration globale           | 2,4         | 4,2        | 1,7        | 8,3         |
|                                       |                               | flux entrant                   | 15,2        | 7,0        | 13,5       | 35,7        |
|                                       | <b>sorties</b>                | Besoins AEP                    | 0,6         | 0,1        | 4,5        | 5,2         |
|                                       |                               | Flux sortants                  | 14,8        | 9,0        | 3,5        | 27,3        |
|                                       |                               | Consommation en eau            | <b>2,30</b> | <b>1,0</b> | <b>8,5</b> | 11,8        |
|                                       | <b>Recharge annuelle en m</b> |                                | 0,05        | 0,11       | 0,22       | 0,10        |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>Assolement en ha</b>       | Maraîchage                     | 0,0         | 20,0       | 150,0      | 170,0       |
|                                       |                               | Céréales                       | 42,1        | 58,8       | 181,5      | 282,4       |
|                                       |                               | Cultures fourragères           | 5,0         | 20,0       | 300,0      | 325,0       |
|                                       |                               | Arboriculture                  | 300         | 34         | 580        | 914,0       |
|                                       |                               | <b>Surface totale</b>          | 347,1       | 132,8      | 1211,5     | 1691,4      |
|                                       | <b>VA en DH</b>               | Maraîchage                     | 0           | 245000     | 1837500    | 2082500     |
|                                       |                               | Céréales                       | 71735       | 100304     | 309395     | 481434      |
|                                       |                               | Cultures fourragères           | 3675        | 14700      | 220500     | 238875      |
|                                       |                               | Arboriculture                  | 408000      | 46240      | 788800     | 1243040     |
|                                       |                               | <b>VA agricole totale (DH)</b> | 483410      | 406244     | 3156195    | 4045849     |
|                                       | <b>Total emploi induit</b>    |                                | 521         | 199        | 1817       | 2537        |

Tableau 26 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à L'horizon 2015

|                                       |                               |                                | UN          | US         | UO         | Total nappe |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>                | Infiltration globale           | 2,4         | 4,2        | 1,7        | 8,3         |
|                                       |                               | flux entrant                   | 15,2        | 7,0        | 13,5       | 35,7        |
|                                       | <b>sorties</b>                | Besoins AEP                    | 0,7         | 0,2        | 4,7        | 5,5         |
|                                       |                               | Flux sortants                  | 14,8        | 9,0        | 3,5        | 27,3        |
|                                       |                               | Consommation en eau            | <b>2,25</b> | <b>0,8</b> | <b>8,3</b> | 11,4        |
|                                       | <b>Recharge annuelle en m</b> |                                | 0,05        | 0,11       | 0,2        | 0,1         |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>Assolement en ha</b>       | Maraîchage                     | 0,0         | 15,0       | 150,0      | 165,0       |
|                                       |                               | Céréales                       | 36,6        | 47,9       | 200,0      | 284,4       |
|                                       |                               | Cultures fourragères           | 5,0         | 10,0       | 249,7      | 264,7       |
|                                       |                               | Arboriculture                  | 300         | 34         | 580        | 914,0       |
|                                       |                               | <b>Surface totale</b>          | 341,6       | 106,9      | 1179,7     | 1628,1      |
|                                       | <b>VA en DH</b>               | Maraîchage                     | 0           | 183750     | 1837500    | 2021250     |
|                                       |                               | Céréales                       | 62362       | 81591      | 341000     | 484952      |
|                                       |                               | Cultures fourragères           | 3675        | 7350       | 183540     | 194565      |
|                                       |                               | Arboriculture                  | 408000      | 46240      | 788800     | 1243040     |
|                                       |                               | <b>VA agricole totale (DH)</b> | 474037      | 318931     | 3150840    | 3943808     |
|                                       | <b>Total emploi induit</b>    |                                | 512         | 160        | 1770       | 2442        |

Tableau 27 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 1 (barrage Fask ) à L'horizon 2025

|                                       |                                |                      | UN         | US         | UO         | Total nappe |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>                 | Infiltration globale | 2,4        | 4,2        | 1,7        | 8,3         |
|                                       |                                | flux entrant         | 15,2       | 7,0        | 13,5       | 35,7        |
|                                       | <b>sorties</b>                 | Besoins AEP          | 0,8        | 0,3        | 5,8        | 7,0         |
|                                       |                                | Flux sortants        | 14,8       | 9,0        | 3,5        | 27,3        |
|                                       |                                | Consommation en eau  | <b>2,1</b> | <b>0,7</b> | <b>6,9</b> | 9,7         |
| <b>Recharge annuelle en m</b>         |                                | 0,04                 | 0,11       | 0,19       | 0,09       |             |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>Assolement en ha</b>        | Maraîchage           | 0,0        | 10,0       | 100,0      | 110,0       |
|                                       |                                | Céréales             | 17,7       | 44,8       | 164,0      | 226,5       |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 5,0        | 5,0        | 111,6      | 121,6       |
|                                       |                                | Arboriculture        | 300        | 34         | 580        | 914,0       |
|                                       | <b>Surface totale</b>          |                      | 322,7      | 93,8       | 955,6      | 1372,1      |
|                                       | <b>VA en DH</b>                | Maraîchage           | 0          | 122500     | 1225000    | 1347500     |
|                                       |                                | Céréales             | 30149      | 76392      | 279620     | 386161      |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 3675       | 3675       | 81999      | 89349       |
|                                       |                                | Arboriculture        | 408000     | 46240      | 788800     | 1243040     |
|                                       | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 441824     | 248807     | 2375419    | 3066051     |
|                                       | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 484        | 141        | 1433       | 2058        |

Tableau 28 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'état actuel

|                                       |                                |                      | UN          | US         | UO         | Total nappe |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|------------|------------|-------------|
| <b>Bilan hydrogéologique</b>          | <b>entrées</b>                 | Infiltration globale | 2,8         | 4,3        | 1,9        | 9,0         |
|                                       |                                | flux entrant         | 15,2        | 7,0        | 13,5       | 35,7        |
|                                       | <b>sorties</b>                 | Besoins AEP          | 0,6         | 0,1        | 4,5        | 5,2         |
|                                       |                                | Flux sortants        | 14,8        | 9,0        | 3,5        | 27,3        |
|                                       |                                | Consommation en eau  | <b>2,30</b> | <b>1,0</b> | <b>8,8</b> | 12,1        |
| <b>Recharge annuelle en m</b>         |                                | 0,10                 | 0,12        | 0,21       | 0,12       |             |
| <b>Agriculture irriguée / pompage</b> | <b>Assolement en ha</b>        | Maraîchage           | 0,0         | 20,0       | 170,0      | 190,0       |
|                                       |                                | Céréales             | 42,1        | 58,8       | 194,9      | 295,8       |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 5,0         | 20,0       | 300,0      | 325,0       |
|                                       |                                | Arboriculture        | 300         | 34         | 580        | 914,0       |
|                                       | <b>Surface totale</b>          |                      | 347,1       | 132,8      | 1244,9     | 1724,8      |
|                                       | <b>VA en DH</b>                | Maraîchage           | 0           | 245000     | 2082500    | 2327500     |
|                                       |                                | Céréales             | 71735       | 100304     | 332334     | 504372      |
|                                       |                                | Cultures fourragères | 3675        | 14700      | 220500     | 238875      |
|                                       |                                | Arboriculture        | 408000      | 46240      | 788800     | 1243040     |
|                                       | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 483410      | 406244     | 3424134    | 4313787     |
|                                       | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 521         | 199        | 1867       | 2587        |



Tableau 29 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'horizon 2015

|                                |                                | UN                   | US          | UO         | Total nappe |         |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|---------|
| Bilan hydrogéologique          | entrées                        | Infiltration globale | 2,8         | 4,3        | 1,9         | 9,0     |
|                                |                                | flux entrant         | 15,2        | 7,0        | 13,5        | 35,7    |
|                                | sorties                        | Besoins AEP          | 0,7         | 0,2        | 4,7         | 5,5     |
|                                |                                | Flux sortants        | 14,8        | 9,0        | 3,5         | 27,3    |
|                                |                                | Consommation en eau  | <b>2,25</b> | <b>0,8</b> | <b>8,6</b>  | 11,7    |
| <b>Recharge annuelle en m</b>  |                                | 0,10                 | 0,11        | 0,2        | 0,1         |         |
| Agriculture irriguée / pompage | Assolement en ha               | Maraîchage           | 0,0         | 15,0       | 160,0       | 175,0   |
|                                |                                | Céréales             | 36,6        | 47,9       | 200,0       | 284,4   |
|                                |                                | Cultures fourragères | 5,0         | 10,0       | 281,1       | 296,1   |
|                                |                                | Arboriculture        | 300         | 34         | 580         | 914,0   |
|                                | <b>Surface totale en Ha</b>    |                      | 341,6       | 106,9      | 1221,1      | 1669,6  |
|                                | VA en DH                       | Maraîchage           | 0           | 183750     | 1960000     | 2143750 |
|                                |                                | Céréales             | 62362       | 81591      | 341000      | 484952  |
|                                |                                | Cultures fourragères | 3675        | 7350       | 206640      | 217665  |
|                                |                                | Arboriculture        | 408000      | 46240      | 788800      | 1243040 |
|                                | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 474037      | 318931     | 3296440     | 4089408 |
|                                | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 512         | 160        | 1832        | 2504    |

Tableau 30 : Résultats de l'exploitation du modèle OGERE pour le scénario 2 (barrage Fask + barrages de dérivation de crue) à l'horizon 2025

|                                |                                | UN                   | US         | UO         | Total nappe |         |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------|------------|-------------|---------|
| Bilan hydrogéologique          | entrées                        | Infiltration globale | 2,8        | 4,3        | 1,9         | 9,0     |
|                                |                                | flux entrant         | 15,2       | 7,0        | 13,5        | 35,7    |
|                                | sorties                        | Besoins AEP          | 0,8        | 0,3        | 5,8         | 7,0     |
|                                |                                | Flux sortants        | 14,8       | 9,0        | 3,5         | 27,3    |
|                                |                                | Consommation en eau  | <b>2,1</b> | <b>0,7</b> | <b>7,1</b>  | 9,9     |
| <b>Recharge annuelle en m</b>  |                                | 0,09                 | 0,12       | 0,21       | 0,12        |         |
| Agriculture irriguée / pompage | Assolement en ha               | Maraîchage           | 0,0        | 10,0       | 152,2       | 162,2   |
|                                |                                | Céréales             | 17,7       | 44,8       | 100,0       | 162,5   |
|                                |                                | Cultures fourragères | 5,0        | 5,0        | 200,0       | 210,0   |
|                                |                                | Arboriculture        | 300        | 34         | 580         | 914,0   |
|                                | <b>Surface totale en Ha</b>    |                      | 322,7      | 93,8       | 1032,2      | 1448,7  |
|                                | VA en DH                       | Maraîchage           | 0          | 122500     | 1865062     | 1987562 |
|                                |                                | Céréales             | 30149      | 76392      | 170500      | 277041  |
|                                |                                | Cultures fourragères | 3675       | 3675       | 147000      | 154350  |
|                                |                                | Arboriculture        | 408000     | 46240      | 788800      | 1243040 |
|                                | <b>VA agricole totale (DH)</b> |                      | 441824     | 248807     | 2971362     | 3661994 |
|                                | <b>Total emploi induit</b>     |                      | 484        | 141        | 1548        | 2173    |

### 5.6.3. COMPARAISON DES DIFFERENTS SCENARIOS D'AMENAGEMENT TESTES

Les tableaux suivants récapitulent les différents résultats du modèle pour chaque scénario testé :

Tableau 31: Comparaison des résultats du modèle OGERE : cas des ressources en eau superficielle

| Scénarios                            | Ressources en eau de surface |                                      |                                       |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                                      | Coût global                  | Superficie d'épandage supplémentaire | Emploi agricole supplémentaire induit |
|                                      | MDH                          | ha                                   | Unités                                |
| <b>sans aménagement</b>              | -                            | -                                    | -                                     |
| <b>Fask</b>                          | 390,0                        | 4600                                 | 2300                                  |
| <b>Fask + barrages de dérivation</b> | 420,2                        | 7365                                 | 3683                                  |
| <b>Assaka</b>                        | 846,0                        | 1500                                 | 750                                   |

Tableau 32: Comparaison des résultats du modèle OGERE : cas des ressources en eau souterraines

| Nappe de Guelmim              |                    |                     |               |  |                 |                     |               |  |                 |                     |               |  |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|---------------|--|-----------------|---------------------|---------------|--|-----------------|---------------------|---------------|--|
| Scénarios                     | Situation actuelle |                     |               |  | Horizon 2015    |                     |               |  | Horizon 2025    |                     |               |  |
|                               | Recharge totale    | Superficie agricole | Emploi induit | Valeur ajoutée agriculture par pompage | Recharge totale | Superficie agricole | Emploi induit | Valeur ajoutée agriculture par pompage | Recharge totale | Superficie agricole | Emploi induit | Valeur ajoutée agriculture par pompage |
|                               | Mm3                | ha                  | unités        | MDH                                    | Mm3             | Ha                  | unités        | MDH                                    | Mm3             | ha                  | unités        | MDH                                    |
| sans aménagement              | 1,5                | 1411                | 2116          | 3,5                                    | 1,5             | 1373                | 2059          | 3,5                                    | 1,2             | 1167                | 1167          | 2,7                                    |
| Fask                          | 3,2                | 1691                | 2537          | 3,9                                    | 3,2             | 1628                | 2442          | 3,9                                    | 2,9             | 1372                | 1372          | 3,1                                    |
| Fask + barrages de dérivation | 3,9                | 1725                | 2587          | 4,3                                    | 3,9             | 1670                | 2504          | 4,1                                    | 3,9             | 1449                | 1449          | 3,7                                    |
| Assaka                        | 1,5                | 1411                | 2116          | 3,5                                    | 1,5             | 1373                | 2059          | 3,5                                    | 1,2             | 1167                | 1167          | 2,7                                    |

De l'examen des tableaux ci-dessus nous constatons une amélioration de la recharge de la nappe à une valeur égale au double de celle constatée pour la situation de référence pour le scénario 1, et à une augmentation de 24 % par rapport à ce dernier pour le scénario 2. De même la construction du barrage Fask permettra un accroissement de 20% de la superficie agricole irriguée par pompage de la nappe (22% pour le scénario 3) et donc une valeur ajoutée supplémentaire de 13% (23% pour le scénario 3). L'augmentation de l'emploi agricole induit par cette activité suit la même tendance que les superficies agricoles.

En outre, la construction du barrage Fask va améliorer l'état d'exploitation des eaux superficielles en augmentant les superficies irriguées par épandage de 4600 ha. La réalisation de nouveaux barrages de dérivation des crues dominant une superficie de 2765 ha amène ces superficies à 7365 ha ce qui permet de générer 3683 emplois pour le cas du scénario 3. Le dernier scénario testé (barrage Assaka) ne fournit aucune amélioration notable de l'existant.

Pour comparer l'effet des différents scénarios testés sur l'amélioration de la gestion des ressources en eau souterraines et le développement socio-économique de la région, nous avons effectué une analyse multi-critères en appliquant des coefficients de pondération adéquats sur les critères d'analyse et en attribuant la note 3 au scénario le plus avantageux, la note 1 à celui qui présente le moins avantageux et la note 2 à celui qui se trouve en situation intermédiaire. Le scénario retenu est celui qui présente la note la plus élevée. Le tableau suivant présente les critères et les résultats de cette analyse :

**Tableau 33: Analyse multi-critères pour le choix du scénario d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim**

|                                       |  |                            | Scénario 1 | Scénario 2                    | Scénario 3 |
|---------------------------------------|--|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|
|                                       | Critères   | Coefficient de pondération | Fask       | Fask + barrages de dérivation | Assaka     |
|                                       | Coût d'investissement et d'exploitation                                  | 3                          | 3          | 2                             | 1          |
|                                       | Facilité de réalisation des ouvrages                                     | 1                          | 2          | 2                             | 1          |
| <b>Ressources en eau de surface</b>   | Mobilisation supplémentaire des terres agricoles irriguées épandage      | 2                          | 2          | 3                             | 1          |
|                                       | Gain en volume dérivé pour l'épandage des eaux de crue                   | 2                          | 2          | 3                             |            |
| <b>Ressources en eau souterraines</b> | Recharge de la nappe   | 3                          | 2          | 3                             | 1          |
|                                       | Possibilité de développement de l'agriculture irriguée/pompage           | 2                          | 2          | 3                             | 1          |
|                                       | Valorisation de l'assolement pratiqué en irrigation à partir de la nappe | 2                          | 2          | 3                             | 1          |
|                                       | Emploi agricole induit total   | 2                          | 2          | 3                             | 1          |
|                                       | Emploi induit / tourisme (plage blanche)                                 | 1                          |            |                               | 3          |
| <b>Note globale</b>                   |  |                            | <b>33</b>  | <b>41</b>                     | <b>18</b>  |

Selon cette analyse, c'est le scénario 2 : Réalisation du Barrage Fask et des ouvrages de dérivation des eaux de crue qui pourrait être retenu pour l'aménagement intégré des ressources en eau de Guelmim.

## **5.7. CONCLUSION : SCHEMA D'AMENAGEMENT PROPOSE ET MESURES D'ACCOMPAGNEMENT**

### **5.7.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION RETENUE**

L'aménagement retenu pour la plaine de Guelmim est la réalisation du barrage Fask et des barrages de dérivation des crues « Ida Oulgane », « Id Iaaza », « Ikkem » sur oued Seyyad, et « Asrassar » sur oued Assaka, en plus de 2 barrages écrêtements situés dans le périmètre d'Oum Al Achar : « Tlat Ntramt » et « N'Gouli ».

Le gain total en volume dérivée est évalué à 14.3 Mm<sup>3</sup> dont 11.4 Mm<sup>3</sup> pour le barrage Fask, ce qui permettra une irrigation de 7365 ha supplémentaire par épandage des eaux d crue. Le coût global du projet s'élève à 420.2 MDH.

### **5.7.2. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT**

Pour pouvoir assurer une recharge annuelle de la nappe de Guelmim de 3,9 Mm<sup>3</sup> à l'horizon de 2025 tout en assurant en priorité les besoins en eau potable des villes de Guelmim et Tan Tan en plus des centres ruraux, il est recommandé de prendre, en urgence, des mesures pour limiter les prélèvements agricoles par pompage de la nappe. En effet, l'utilisation du modèle OGERE nous a permis de déterminer, pour le cas de l'aménagement proposé, la superficie maximale à allouer à l'agriculture irriguée par les eaux souterraines ainsi que l'assolement à pratiquer pour chaque unité de gestion de la nappe. Nous rappelons que, dans le but de faciliter la gestion et proposer un plan d'action par communes, nous avons respecté les limites administratives pour le découpage de la nappe en unités homogènes comme suit :

- Unité nord et nord-est UN : regroupe les communes de Timoulay, Bouizakarne, Tagante, Ifrane Anti Atlas et Abaynou ;
- Unité sud US : représenté par la commune de Fask ;
- Unité ouest UO : regroupe les communes d'Asrir, Laqsabi Tagoust, Guelmim et Taliouine Assaka.

Le tableau et le graphique suivants présentent les superficies et les assolements pratiqués actuellement et ceux du schéma d'aménagement de la région de Guelmim proposé dans le cadre de cette étude :

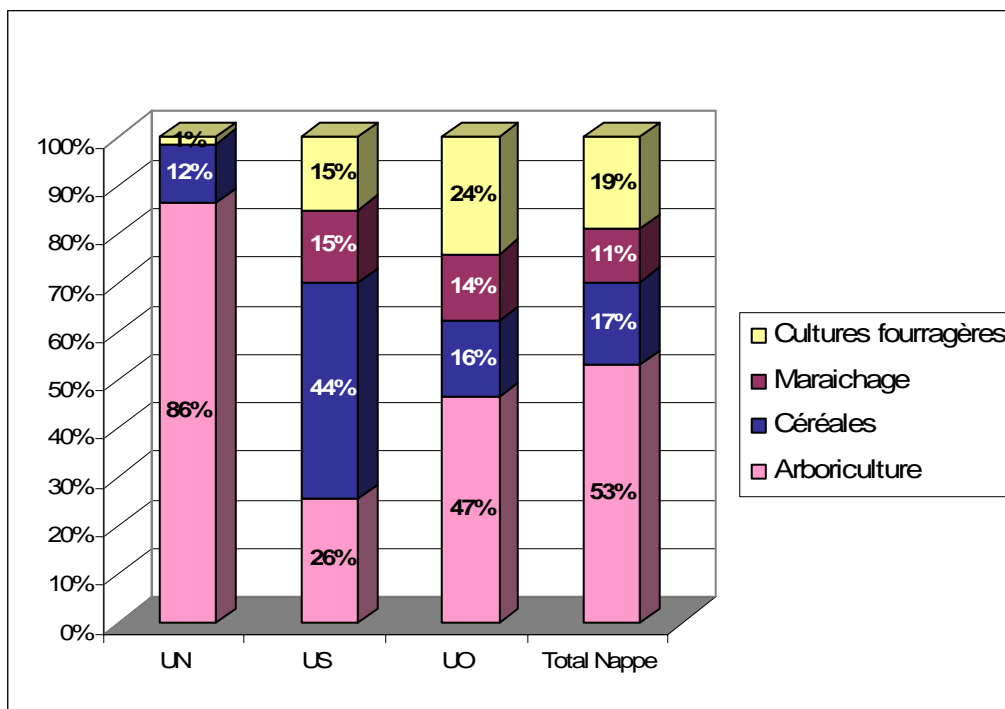


Figure 40 : Assolement en irrigation par pompage préconisé dans le schéma d'aménagement de la plaine de Guelmim

Tableau 34 : Situation actuelle des assolements pratiquées

|                           | Commune          | Cultures maraichères | Cultures fourragères | Céréales   | Plantations | Superficie totale en 2005 |
|---------------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------|-------------|---------------------------|
| UN                        | BOUIZAKARNE      | 9%                   | 36%                  | 18%        | 36%         | 11                        |
|                           | TAGANTE          | 7%                   | 33%                  | 19%        | 42%         | 221                       |
|                           | IFRANE A.A       | 16%                  | 25%                  | 17%        | 42%         | 235                       |
|                           | TIMOULAY         | 13%                  | 26%                  | 13%        | 48%         | 246                       |
|                           | TAGHJIJT         | 4%                   | 33%                  | 18%        | 44%         | 136                       |
|                           | ABAYNOU          | 47%                  | 21%                  | 0%         | 32%         | 340                       |
|                           | <b>UN</b>        | <b>21%</b>           | <b>26%</b>           | <b>12%</b> | <b>41%</b>  | <b>1189</b>               |
| US                        | FASK             | 56%                  | 16%                  | 0%         | 28%         | 120                       |
|                           | <b>US</b>        | <b>56%</b>           | <b>16%</b>           | <b>0%</b>  | <b>28%</b>  | <b>120</b>                |
| UO                        | GUELMIM          | 58%                  | 17%                  | 0%         | 26%         | 424                       |
|                           | ASRIR            | 70%                  | 10%                  | 1%         | 19%         | 1022                      |
|                           | LAQSABI TAGOUST  | 49%                  | 25%                  | 0%         | 26%         | 936                       |
|                           | TALIOUINE ASSAKA | 34%                  | 27%                  | 11%        | 27%         | 146                       |
|                           | <b>UO</b>        | <b>58%</b>           | <b>17%</b>           | <b>1%</b>  | <b>23%</b>  | <b>2528</b>               |
| <b>TOTAL en 2005 (ha)</b> |                  | <b>1793</b>          | <b>774</b>           | <b>166</b> | <b>1104</b> | <b>3837</b>               |

Les assolements proposés par le schéma d'aménagement suppose un maintien des superficies des plantations pour toute la région et une pratique très limitée du maraîchage et les cultures fourragères à irriguer strictement en irrigation localisé. Et donc un effort supplémentaire de reconversion en irrigation localisé doit être employé dans la région en parallèle avec l'amélioration des pratiques agricoles.

La superficie maximale qui peut être irriguée par pompage ne doit pas dépasser 340 ha pour l'unité Nord qui est actuellement à 1189 ha. Comme les communes de Timoulay, Bou Izakarne, Ifrane A.A et Taghjijt ont connu une dégradation de leur espace oasisien à cause de la diminution des débits de sources et résurgences qui assurent l'irrigation pérenne de 3000 ha (voir photo suivante), nous recommandons d'interdire les pompages dans ces communes pour préserver les oasis de cette région, et de limiter l'extension des superficies irriguées par pompage dans la commune Abaynou à leur situation actuelle (qui est exactement égale à celle préconisée pour l'unité nord de la nappe) mais en interdisant la pratique du maraîchage et en réduisant les cultures fourragères à 2% de la superficie totale.

Pour la commune de Fask, un changement d'assolement doit être effectué pour ramener les surfaces allouées au maraîchage et aux cultures fourragères à 11% et 5 % respectivement, en faveur de la céréaliculture et de l'arboriculture.



Figure 41 : Etat de dégradation des oasis de la région nord-est de la plaine de Guelmim (commune de Timoulay)

La situation est plus compliquée pour l'unité Ouest pour laquelle la superficie maximale tolérée dans ce secteur est inférieure de 40% à celle pratiquée actuellement. De plus, c'est l'unité pour laquelle il faut, d'une part, sauvegarder les pompages actuelles dans sa partie aval pour limiter les pertes par évaporation et par sortie en mer aux valeurs retenues dans le modèle OGERE, et d'autre



part, réduire les prélèvements agricoles dans son secteur amont qui assure l'alimentation en eau potable de la région.

Ainsi, un effort considérable de mise en œuvre de la législation et de contrôle de la nappe doit être effectué pour l'interdiction des pompages près des captages d'Oum Al Achar à travers la délimitation de l'aire de protection des champs captant de l'ONEP. De même pour les communes de Guelmim, et surtout Asrir et Laqsabi qui ont connu un développement spectaculaire des superficies irriguées par pompage, une réduction de ces superficies s'imposent. Ceci est rendu possible par le nouveau schéma d'aménagement qui va permettre la création de nouveaux périmètres d'épandage dans ce secteur sensible. De plus, un assolement de 15% pour le maraîchage, 10% pour les cultures fourragères est à respecter dans cette région.

Aussi, comme le résultat recherché par le nouveau schéma d'aménagement (protection de la nappe destinée à l'alimentation en eau potable en priorité et développement économique de la zone) ne peut se réaliser sans contrôle des prélèvements agricoles à partir de la nappe, nous avons pu proposer, à travers l'élaboration d'un modèle de gestion simplifié et un découpage raisonné de la nappe selon des critères agro-hydrogéologiques et socio-économiques, un outil de réflexion qui pourrait aider les responsables de chaque unité de gestion de la région (les communes) à réfléchir quant à la gestion de l'exploitation des ressources en eau souterraines en agriculture tout en assurant un emploi et un revenu maximum de cette activité considérée comme pilier du développement économique de la région.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Depuis plusieurs années, l'aquifère de Guelmim, d'un millier de Km<sup>2</sup> au sein d'une vaste zone semi-aride, a sollicité plusieurs études que ça soit pour la compréhension de son fonctionnement hydrodynamique ou dans l'objectif de l'amélioration des connaissances hydrogéologiques sur la région.

### *Qu'apporte ce travail de plus ?*

- Une base de données géo-spatiale : mise en place d'une base de donnée couplé d'un SIG « GéoBaGue » ;
- Une étude hydrogéologique actualisée sur la région ;
- Un zonage de l'étendue de la nappe plioquaternaire en unités homogènes selon des critères agro-hydrogéologiques et socio-économiques pertinents dans l'objectif de construire le modèle conceptuel de la nappe
- Une meilleure connaissance des différents entrées et sorties pour chaque zone homogène de la nappe à travers le calcul détaillée de son bilan hydrogéologique pour la période s'étalant de 1989 à 2005 ;

Un modèle d'optimisation de la gestion des ressources en eau « OGERE »

### *Base de données + SIG « GéoBaGue »*

L'utilisation des SIG dans l'élaboration des cartes thématiques nécessaires pour l'étude a constitué un choix primordial pour surmonter toutes les difficultés et les subtilités de l'hydrogéologie, science s'appuyant sur des données complexes et diverses et qui demandent un travail multidisciplinaire.

En outre, la conception d'une base de données Access intégrant l'affichage simultané des données et des cartes élaborées sous ArcGIS dans une fenêtre *ArcMap*® standard a constitué un apport supplémentaire aux travaux de cartographie effectués, en permettant de gérer une grande masse de données attributaires et spatiales bien organisées.

Enfin, nous avons aussi fourni aux futurs utilisateurs du SIG un menu personnalisé qui permet d'interroger toutes les cartes thématiques relatives à la région de Guelmim sous ArcGIS et d'accéder aux différentes couches d'informations élaborées afin de faciliter l'actualisation et la mise jour des données géographiques.

### *Etude Actualisation des connaissances hydrogéologiques sur la région*

Une meilleure connaissance des potentialités en eau souterraines de la région de Guelmim ne peut se faire sans une étude hydrogéologique détaillée basée sur l'actualisation de toutes les données existantes (géologiques, géophysiques, hydrogéologiques...). En effet, l'étude géologique de la plaine de Guelmim nous a permis d'identifier les principales formations aquifères à savoir : la nappe superficielle contenue dans les dépôts d'âge plioquaternaire, et la nappe profonde circulant dans les calcaires d'âge cambrien qui ne se met en contact avec la première qu'au niveau des bordures.

Comme l'essentiel du potentiel exploitable est localisée dans l'aquifère plioquaternaire qui, outre la satisfaction des besoins en eau potable des villes de Guelmim et Tan Tan, est devenue très sollicitée par les pompages destinés à l'irrigation, nous avons mené une étude plus détaillée cet aquifère qui a abouti à :

- Une meilleure connaissance de la stratigraphie des terrains plioquaternaires ce qui nous a permis de déterminer l'extension verticale et horizontale de ses zones saturées et non saturées, et d'identifier les zones potentielles pour la recharge artificielle de la nappe;
- Une meilleure compréhension du régime d'écoulement de la nappe et de la distribution de ses paramètres hydrodynamiques

### ***Zonage de l'étendue de la nappe plioquaternaire en unités homogènes***

A travers le choix de critères essentiellement hydrogéologiques, mais aussi agronomiques et socio-économiques issues de l'exploitation des différentes études et enquêtes, nous avons délimité à l'intérieur de l'étendue de la nappe plioquaternaire 3 unités homogènes représentant des situations très différentes en terme de potentialités et de qualité en eau souterraine, de modalités de gestion et de type d'utilisation, et surtout en terme de vulnérabilité à l'exploitation. Cette délimitation s'est avérée très utile pour la construction du modèle conceptuel de la nappe étudiée, et la définition de règles de gestion optimale des ressources en eau par zone homogène de la nappe, et donc à l'identification d'unités de gestion distinctes de cette importante ressource en eau. Ce qui nous a permis d'esquisser, à ce stade de l'étude, quelques orientations stratégiques pour la gestion de cette importante ressource en eau.

### ***Bilan hydrogéologique détaillé de la nappe de Guelmim***

Une simple modélisation du comportement de l'aquifère de Guelmim a été effectuée moyennant le calcul de son bilan hydrogéologique détaillé par unité homogène et à pas de temps mensuel pour la période de 1989 à 2005. Calé sur les mesures piézométriques, ce modèle nous a permis, dans un délai plus court, de déterminer avec une bonne précision les différentes entrées et sorties du système aquifère, de reconstituer l'historique de variation de ses réserves, et d'évaluer le déficit par secteur.

### ***Elaboration d'un outil de gestion intégrée des ressources en eau « modèle OGERE »***

En employant un effort très considérable de réflexion, nous avons pu développer une nouvelle méthodologie qui a abouti à l'élaboration du modèle d'optimisation de la gestion des ressources en eau « OGERE » alliant entre gestion durable des ressources en eau souterraines et développement socio-économique. Ce modèle nous a servi pour la définition d'un scénario d'aménagement intégrée de la région de Guelmim assurant :

- La recharge artificielle de la nappe souterraine ;
- La mobilisation maximale des ressources en eau superficielles et le développement des systèmes d'irrigation par épandage de crue ;
- La pratique d'assolements adéquats pour contrôler l'agriculture irriguée par pompage tout en valorisant au maximum le revenu des agriculteurs ;
- L'augmentation de l'emploi agricole induit (pour les secteurs irrigués par pompage et par épandage).

En testant plusieurs scénarios d'aménagements proposés pour la zone d'étude, nous avons mis en évidence l'intérêt de la réalisation du barrage Fask sur l'oued Seyyad et des ouvrages de dérivation des crues sur la recharge de la nappe souterraine et la mobilisation des eaux superficielles, et nous avons exploité le modèle pour la définition de règles optimales d'exploitation des ressources en eau souterraine pour l'irrigation, à travers des pratiques agricoles et un assolement adéquats pour chaque unité de gestion.

## **RECOMMANDATIONS**

La région de Guelmim connaît des problèmes de disponibilité en eau résultant à la fois d'une forte dépendance des aléas climatiques et surtout d'un *gâchis* sensible des ressources naturelles et hydrauliques ce qui est en contradiction avec les conditions d'un véritable développement régional et d'un aménagement intégré des ressources en eau. Ainsi, au terme de ce travail et sur la base des résultats obtenus, nous recommandons un ensemble d'actions visant la maîtrise des facteurs pesant négativement sur les ressources en eau, afin d'infléchir positivement les tendances en cours et d'asseoir les bases d'un développement durable du milieu physique et socio-économique. Ces actions tournent autour des axes suivants :

### ***Rationalisation de la gestion des ressources en eau***

- Des mesures techniques de traitement visant la complémentarité des ressources en eau superficielles et souterraines afin de développer les réserves de la nappe et de la soulager de la surexploitation tel est le cas du scénario d'aménagement proposé dans le cadre de cette étude ;
- Des mesures préventives qui consistent à :
  - maîtriser d'avantage le contrôle des écoulements de surface et des prélèvements sur la nappe. Il s'en suit un suivi des précipitations, des niveaux piézométriques et de la qualité chimique des eaux à travers des réseaux de contrôle bien répartis. Ainsi, nous recommandons une multiplication des points de suivis dans la région nord et surtout dans la région ouest de la nappe qui est la plus sollicitée par les prélèvements en plus de l'effet de l'évaporation alors qu'elle assure l'alimentation en eau potable de la région ;
  - Mettre en place des mesures législatives pour décréter des zones de protection de la nappe notamment autour des captages d'AEP à l'ouest, des zones d'alimentation des sources au nord et nord-est de la plaine, et des retenues du barrage projeté sur l'oued Seyyad ;
  - Elaborer des cartes de baisse du niveau piézométrique et de vulnérabilité à la pollution afin de localiser graphiquement les zones sensibles à l'exploitation et la pollution et permettre de lancer un programme d'actions pour pallier à ces problèmes.

### ***Nécessité de reconversion de l'agriculture :***

En effet, les effets recherchés par un aménagement donné nécessitent une exploitation plus rationnelle de l'activité agricole supposant une restriction des pompages de la nappe qui ne cessent de se multiplier. Ainsi, il n'est permis en aucun cas d'autoriser l'installation des exploitations productrices de produits maraîchers comme c'était le cas pour les dernières années. Comme le schéma d'aménagement proposé prévoit une diminution des superficies agricoles et une reconversion des systèmes de cultures, il est impératif de faire des propositions concrètes autour des pratiques agricoles adéquates permettant une meilleure valorisation et une économie de l'eau (travaux de sols,

fertilisations, traitements phytosanitaires, cultures et variétés adapté au climat de la région...), et de mettre en place un programme de sensibilisation et de formation.

De même il est nécessaire d'encourager l'irrigation par épandage des eaux de crue, technique typique de la région, en menant une réflexion sur l'amélioration du fonctionnement de ce système d'irrigation traditionnel et les modalités d'implication de la population locale dans la gestion et l'entretien des ouvrages de mobilisation des eaux de crue.

En outre, il est recommandé de renforcer les dispositifs d'aide et de soutien pour le secteur agricole surtout que la zone connaît des aléas climatiques (sécheresses, crues violentes) qui pèse sur sa productivité.

### ***Protection du milieu naturel***

Dans le cas d'une région connue pour son climat aride telle que Guelmim, un renforcement des opérations de lutte contre la désertification, l'ensablement et l'érosion s'impose. De même, un effort supplémentaire doit être employé pour la protection de l'espace oasien de la région qui connaît une forte dégradation en lançant un projet de sauvegarde des palmeraies et en luttant contre les maladies ravageant cette culture.

Enfin, pour conclure, nous profitons de cette occasion pour proposer d'autres chantiers stratégiques à encourager dans la région de Guelmim qui s'inscrivent dans l'initiative nationale du développement humain à savoir :

- Le tourisme : en effet, la région de Guelmim dispose de plusieurs atouts qui permettent de la classer parmi les régions à vocation touristiques (paysages variés, oasis, sites rupestres, coutumes...);
- L'artisanat qui présente un appui à l'activité touristique ;
- L'industrie : la région est très riche en minerais traditionnels et dispose de plusieurs produits locaux.

Ainsi, une promotion de ces secteurs peut contribuer au développement humain de la région à travers la diversification d'activités génératrices de revenus surtout dans le cas où une restriction de l'expansion de l'agriculture s'impose avec le nouveau schéma d'aménagement proposé. Ceci peut être réalisé par le lancement de projets encourageant les produits de terroirs, la création d'unités agro-alimentaires, d'unités de tris et de conditionnement des produits locaux...

Le développement de ces secteurs méritent donc des études spécifiques et nécessitent la mise en place de mesures d'accompagnements sociales bien adaptées (facilité de micro-crédit, couverture sociale...).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**A.Coudrain – Risbstein et al, 1992.** L'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride est-elle indépendante de la nature du sol. CR Acad. Scie. Paris, p. 159-156.

**ADI, CACG. 2006.** Etude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim – Actualisation des études des ressources en superficielles – Elaboration d'un modèle hydrologique. 19 p.

**ADI, CACG. 2006.** Etude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim – Actualisation des études des ressources en superficielles – Elaboration des séries des apports d'eau. p. 24-26.

**ADI, CACG. 2006.** Etude d'actualisation du schéma d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Guelmim – Actualisation des études de la demande en eau potable. 90 p.

**Agoussine M. 1993.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Guelmim (modélisation et gestion des ressources en eau souterraine. Thèse du 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Sciences de Semlalia. Marakech. 205 p.

**Belqasmi R. 2000.** Élaboration d'un logiciel SIG pour la délimitation des périmètres de protection des captages des eaux souterraines. Etude de cas : champ captant d'Ouled Teima. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. Option génie rural. IAV Hassan II. Rabat. 105 p.

**Compagnie Générale de Géophysique. 1992.** Prospection géophysique par gravimétrie : étude des plaines de Guelmim et de Bou Isakarn. 43 p.

**CRTS, 2000.** Etude pilote par télédétection pour l'exploration des eaux souterraines en zone aride – cas de la nappe profonde de Guelmim. 77 p.

**Dijon R. 1966.** Reconnaissance hydrogéologique et ressources en eau du bassin des oueds Seyad - Ouarg-Noun. 170 p.

**Dirasset. 2003.** Stratégie de développement et d'aménagement des oasis au Maroc – stratégie de développement et plans d'actions. p 19-24, 195-197.

**Dirasset. 2003.** Stratégie de développement et d'aménagement des oasis au Maroc – Rapports d'enquêtes et problématiques. p 9-32, 70-71.

**Dirasset. 2003.** Stratégie de développement et d'aménagement des oasis au Maroc – Analyses, diagnostics, typologie des oasis. p 112-117.

**Direction de la recherche et de la planification de l'eau. 1982.** Synthèse des connaissances hydrogéologiques sur la région de Guelmim. 28 p.

**Direction de la recherche et de la planification de l'eau. 1999.** Modèle mathématique et carte hydrogéologique de Guelmim. 38 p.

**Direction de la région hydraulique du Souss Massa. 1997.** Note sur les ressources en eau souterraine de la plaine de Guelmim. 9 p.

**DPA Guelmim. 2001.** Le potentiel hydro-agricole des périmètres d'irrigation par épandage des eaux de crue dans la province de Guelmim. 12 p.

**ESRI France © 2001, 2002.** Qu'est ce que ArcGIS. [en ligne]. 107 p. Sur Internet : [http:// support.esrifrance.fr](http://support.esrifrance.fr)

**Esri. 2002.** Qu'est ce que ArcGIS® 9.1 – chap8 Concepts liées aux données SIG dans la géodatabase [en ligne]. 14p. Sur Internet: <http://support.esrifrance.fr/téléchargement/index.asp>.

**Géootlas. 1994.** Etude géophysique par prospection électrique (région de Guelmim). 15 p.

**Géootlas. 1997.** Etude par sismique réflexion haute résolution de la plaine de Guelmim. 70 p.

**Hammani A. et Bounja R , 1991.** Etude des problèmes de drainage et d'engorgement des sols dans le périmètre irrigué de Tadla : Bilan hydrogéologique de la nappe de Béni Moussa et Diagnostic des problèmes de drainage. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle de l'IAV Hassan II, Option Génie Rural.

**Hammani A., 2003.** Cours d'hydrogéologie. 116 p.

**Lyazidi, 2001.** Etude de modélisation isotopique de la nappe de Guelmim. 52 p.

**Nejarrou, 2006.** Recharge artificielle des nappes souterraines, expérience nationale et internationale : application a une nappe du Maroc. **Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. EHTP. Casablanca. 75 p.**

**SCET, SOGREA. 1996.** Etude du plan directeur de l'aménagement des eaux des bassins sud-atlasiques - Etude des ressources en eau – hydrogéologie - unités Bas-Draa, Tiznit-Ifni, Guelmim.

**SCET, SOGREA. 1999.** Etude du plan directeur de l'aménagement des eaux des bassins sud-atlasiques – Etude des schémas d'aménagement. p. 1 - 10, 96 - 112.

**Secrétariat d'Etat chargé de l'eau. 2004.** Contribution des ressources en eau au développement socio-économique dans les bassins du sud. 62 p.

**Wardi, 1999.** Modèle mathématique et carte hydrogéologique de Guelmim. 38 p.



**ANNEXE**

## Annexe 1: Détail du calcul des besoins en eau de cultures

### DEMANDE CLIMATIQUE - STATION DE GUELMIM

| Données                 | Année   | Oct   | Nov   | Déc  | Jan  | Fév  | Mar   | Avr   | Mai   | Jun   | Jul   | Aoû   | Sep   | Total |
|-------------------------|---------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pluie mensuelle         | moyenne | 7,5   | 29,1  | 23,5 | 16,9 | 20,1 | 14,6  | 5,6   | 2,2   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 7,4   | 127   |
| Températures p(mensuel) |         | 22,1  | 19,6  | 16,2 | 16,5 | 15,7 | 18,1  | 19,0  | 20,1  | 21,3  | 25,3  | 25,0  | 24,0  |       |
| Kt                      |         | 8,01  | 7,23  | 7,21 | 7,35 | 7,05 | 8,39  | 8,70  | 9,49  | 9,43  | 9,62  | 9,19  | 8,33  |       |
| Eto ( mm )              |         | 0,93  | 0,85  | 0,74 | 0,75 | 0,73 | 0,80  | 0,83  | 0,87  | 0,90  | 1,03  | 1,02  | 0,99  |       |
| Pluie efficace ( mm )   | 80%     | 135,4 | 104,9 | 83,3 | 86,8 | 78,6 | 110,5 | 121,5 | 142,1 | 152,0 | 194,4 | 182,7 | 156,8 | 1549  |
| Déficit climatique      |         | 6,0   | 23,3  | 18,8 | 13,5 | 16,1 | 11,7  | 4,5   | 1,8   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 5,9   | 102   |
|                         |         | 129,4 | 81,7  | 64,5 | 73,3 | 62,5 | 98,8  | 117,1 | 140,4 | 152,0 | 194,4 | 182,7 | 150,9 | 1448  |

| Mois            | Oct  | Nov  | Déc  | Jan  | Fév  | Mar  | Avr  | Mai  | Jun  | Jul  | Aoû  | Sep  |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pluie mensuelle | 23,6 | 29,1 | 23,5 | 16,9 | 20,1 | 14,6 | 5,6  | 2,2  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 7,4  |
| Températures*2  | 44,2 | 39,2 | 32,4 | 33,0 | 31,4 | 36,2 | 38,0 | 40,2 | 42,6 | 50,6 | 50,0 | 48,0 |

### BESOINS EN EAU DES CULTURES - ZONES DE POMPAGES - PROVINCE DE GUELMIM

|                       | Année  | Oct   | Nov   | Déc  | Jan  | Fév  | Mar   | Avr   | Mai   | Jun   | Jul   | Aoû   | Sep   | Total  |
|-----------------------|--------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Eto ( mm )            |        | 135,4 | 104,9 | 83,3 | 86,8 | 78,6 | 110,5 | 121,5 | 142,1 | 152,0 | 194,4 | 182,7 | 156,8 | 1549,2 |
| Pluie efficace ( mm ) | 80,00% | 6,0   | 23,3  | 18,8 | 13,5 | 16,1 | 11,7  | 4,5   | 1,8   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 5,9   | 102    |

#### Coefficients culturaux Kc

| Données       | Année | Oct | Nov | Déc  | Jan  | Fév | Mar | Avr | Mai  | Jun  | Jul | Aoû  | Sep |
|---------------|-------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|-----|
| blé           |       |     | 0,4 | 0,55 | 0,75 | 0,9 | 1   | 0,8 | 0,65 | 0    | 0   | 0    | 0   |
| tomate        |       | 0,8 | 0,5 |      |      |     |     |     | 0,8  | 1    | 1   | 1    | 1   |
| pastèque      |       |     |     |      |      |     |     | 0,5 | 0,65 | 0,8  | 0,8 | 0,75 |     |
| luzerne       |       | 0,9 | 0,6 | 0,6  | 0,6  | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,9  | 1    | 1   | 1    | 0,9 |
| mais fourrage |       |     |     |      |      |     |     |     | 0,55 | 0,9  | 1   | 0,9  |     |
| mais grain    |       | 0,8 |     |      |      |     |     |     |      |      | 0,7 | 1    | 1   |
| olivier       |       | 0,4 | 0,4 | 0,3  | 0,3  | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,45 | 0,55 | 0,6 | 0,6  | 0,4 |

## Annexe 1: Détail du calcul des besoins en eau de cultures

### BESOINS EN EAU DES CULTURES - ZONES DE POMPAGES - PROVINCE DE GUELMIM

#### ETP (mm)

| Données       | Année | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aoû | Sep | Total       |
|---------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| blé           |       | 0   | 42  | 46  | 65  | 71  | 111 | 97  | 92  | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>524</b>  |
| tomate        |       | 108 | 52  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 114 | 152 | 194 | 183 | 157 | <b>960</b>  |
| pastèque      |       | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 61  | 92  | 122 | 156 | 137 | 0   | <b>567</b>  |
| luzerne       |       | 122 | 63  | 50  | 52  | 47  | 99  | 109 | 128 | 152 | 194 | 183 | 141 | <b>1341</b> |
| mais fourrage |       | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 78  | 137 | 194 | 164 | 0   | <b>574</b>  |
| mais grain    |       | 108 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 136 | 183 | 157 | <b>584</b>  |
| olivier       |       | 54  | 42  | 25  | 26  | 24  | 33  | 36  | 64  | 84  | 117 | 110 | 63  | <b>677</b>  |

#### Besoins nets à l'hectare (m3/ha)

| Données       | Année | Oct  | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr  | Mai  | Jun  | Jul  | Aoû  | Sep  | Total        |
|---------------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|--------------|
| blé           |       | 0    | 187 | 270 | 516 | 547 | 988 | 928  | 906  | 0    | 0    | 0    | 0    | <b>4342</b>  |
| tomate        |       | 1023 | 292 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 1120 | 1520 | 1944 | 1827 | 1509 | <b>9235</b>  |
| pastèque      |       | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 563  | 906  | 1216 | 1555 | 1371 | 0    | <b>5611</b>  |
| luzerne       |       | 1158 | 397 | 312 | 385 | 311 | 878 | 1049 | 1262 | 1520 | 1944 | 1827 | 1352 | <b>12396</b> |
| mais fourrage |       | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 764  | 1368 | 1944 | 1645 | 0    | <b>5721</b>  |
| mais grain    |       | 1023 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 1361 | 1827 | 1509 | <b>5720</b>  |
| olivier       |       | 481  | 187 | 62  | 125 | 75  | 215 | 320  | 622  | 836  | 1166 | 1096 | 568  | <b>5754</b>  |

## Annexe 1: Détail du calcul des besoins en eau de cultures

### BESOINS EN EAU - ZONES DE POMPAGES - PROVINCE DE GUELMIM

Besoins bruts à l'hectare (m3/ha)

Localisé

efficience =

0,90

| Cultures      | Année | Oct  | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar  | Avr  | Mai  | Jun  | Jul  | Aoû  | Sep  | Total |
|---------------|-------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| blé           |       | 0    | 208 | 300 | 573 | 607 | 1098 | 1031 | 1007 | 0    | 0    | 0    | 0    | 4824  |
| tomate        |       | 1137 | 324 | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 1244 | 1689 | 2160 | 2031 | 1677 | 10261 |
| pastèque      |       | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 625  | 1007 | 1351 | 1728 | 1523 | 0    | 6234  |
| luzerne       |       | 1287 | 441 | 347 | 428 | 345 | 975  | 1166 | 1402 | 1689 | 2160 | 2031 | 1503 | 13773 |
| mais fourrage |       | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 849  | 1520 | 2160 | 1827 | 0    | 6356  |
| mais grain    |       | 1137 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1512 | 2031 | 1677 | 6356  |
| olivier       |       | 535  | 208 | 69  | 139 | 83  | 239  | 355  | 691  | 929  | 1296 | 1218 | 631  | 6393  |

Besoins en eau de l'assolement en m<sup>3</sup> pour 1 hectare

| Cultures      | %              | Oct        | Nov        | Déc        | Jan        | Fév        | Mar        | Avr        | Mai        | Jun        | Jul         | Aoû         | Sep         | Total       |
|---------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| blé           | 0,0%           | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0           | 0           | 0           | 0           |
| tomate        | 1,0%           | 11         | 3          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 12         | 17         | 22          | 20          | 17          | 103         |
| pastèque      | 1,0%           | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 6          | 10         | 14         | 17          | 15          | 0           | 62          |
| luzerne       | 23,8%          | 306        | 105        | 83         | 102        | 82         | 232        | 277        | 334        | 402        | 514         | 483         | 358         | 3278        |
| mais fourrage | 11,2%          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 95         | 170        | 242         | 205         | 0           | 712         |
| mais grain    | 29,0%          | 330        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 438         | 589         | 486         | 1843        |
| olivier       | 34,0%          | 182        | 71         | 23         | 47         | 28         | 81         | 121        | 235        | 316        | 441         | 414         | 215         | 2174        |
| <b>TOTAL</b>  | <b>100,00%</b> | <b>829</b> | <b>179</b> | <b>106</b> | <b>149</b> | <b>111</b> | <b>313</b> | <b>404</b> | <b>686</b> | <b>918</b> | <b>1674</b> | <b>1727</b> | <b>1075</b> | <b>8172</b> |

## Bilan hydrogéologique de la nappe de Guelmim

Détail du calcul des apports et flux latéraux (application de la loi de Darcy)

| Année | apports latéraux |              | apports /abouchement |              | Flux UN vers US |              | Flux UN vers UO |              | Flux US vers UO |              | Flux sortant |              |
|-------|------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
|       | i moy            | débit en l/s | i moy                | débit en l/s | i moy           | débit en l/s | i moy           | débit en l/s | i moy           | débit en l/s | i moy        | débit en l/s |
| 1989  | 1,9%             | 323,0        | 1,1%                 | 73,4         | 1,0%            | 300,0        | 1,7%            | 179,5        | 1,3%            | 354,9        | 1,2%         | 288,0        |
| 1990  | 2,2%             | 374,0        | 1,2%                 | 80,0         | 0,8%            | 235,6        | 2,0%            | 211,2        | 1,0%            | 273,0        | 0,9%         | 216,0        |
| 1991  | 1,9%             | 326,4        | 1,0%                 | 66,7         | 0,8%            | 235,6        | 2,0%            | 211,2        | 0,8%            | 218,4        | 1,0%         | 240,0        |
| 1992  | 2,1%             | 359,1        | 1,0%                 | 66,7         | 0,7%            | 210,0        | 1,1%            | 116,2        | 0,7%            | 191,1        | 0,8%         | 192,0        |
| 1993  | 2,2%             | 374,0        | 1,2%                 | 81,5         | 0,8%            | 240,0        | 0,7%            | 73,9         | 0,8%            | 218,4        | 0,5%         | 125,7        |
| 1994  | 1,9%             | 326,4        | 1,0%                 | 66,7         | 1,0%            | 300,0        | 1,0%            | 105,6        | 1,0%            | 273,0        | 0,7%         | 168,0        |
| 1995  | 2,2%             | 374,0        | 1,4%                 | 96,0         | 0,7%            | 210,0        | 1,0%            | 105,6        | 0,9%            | 245,7        | 0,5%         | 125,7        |
| 1996  | 3,2%             | 550,8        | 1,4%                 | 96,0         | 1,4%            | 420,0        | 1,0%            | 105,6        | 1,4%            | 382,2        | 0,2%         | 48,0         |
| 1997  | 3,0%             | 510,0        | 1,3%                 | 87,3         | 1,2%            | 360,0        | 1,3%            | 137,3        | 1,2%            | 327,6        | 0,2%         | 48,0         |
| 1998  | 3,1%             | 530,4        | 1,3%                 | 87,3         | 1,0%            | 314,2        | 1,6%            | 169,0        | 0,9%            | 245,7        | 0,5%         | 108,0        |
| 1999  | 2,9%             | 486,2        | 1,3%                 | 87,3         | 1,1%            | 330,0        | 2,0%            | 211,2        | 1,2%            | 327,6        | 0,5%         | 120,0        |
| 2000  | 2,5%             | 425,0        | 1,2%                 | 80,0         | 0,8%            | 240,0        | 1,3%            | 137,3        | 0,8%            | 218,4        | 0,2%         | 48,0         |
| 2001  | 2,3%             | 391,0        | 1,3%                 | 87,3         | 0,6%            | 189,0        | 1,4%            | 147,8        | 0,8%            | 218,4        | 0,2%         | 48,0         |
| 2002  | 2,6%             | 442,0        | 1,3%                 | 87,3         | 0,7%            | 216,0        | 1,5%            | 158,4        | 1,3%            | 354,9        | 0,8%         | 192,0        |
| 2003  | 2,8%             | 467,5        | 1,3%                 | 87,3         | 0,9%            | 270,0        | 1,5%            | 162,6        | 1,2%            | 327,6        | 0,3%         | 60,0         |
| 2004  | 2,4%             | 411,4        | 1,2%                 | 80,0         | 0,9%            | 270,0        | 1,8%            | 185,9        | 1,0%            | 273,0        | 0,3%         | 60,0         |
| 2005  | 2,0%             | 340,0        | 1,2%                 | 80,0         | 0,8%            | 240,0        | 0,8%            | 81,3         | 1,0%            | 273,0        | 0,3%         | 60,0         |