

N°d'ordre :

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR

L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN GEOLOGIE

Option : Eau Souterraine et Environnement
(ESE)

THEME

**Estimation de la recharge naturelle d'une nappe
d'eaux souterraines: cas de la nappe du plateau de
Mostaganem (Algérie)**

Présenté par : Mr. Aberkane Mohamed

Soutenu le : 15/06/2016 devant le jury :

Mr. DARI Ouassini *M.C.B. Univ.Oran2.* *Président de jury*

Mme. BELKHEIR Khadidja *M.A.A. Univ.Oran2.* *Examinatrice*

Mme. DEKKICHE Hafida *M.A.A. Univ.Oran2.* *Encadreur*

Oran, 2017

Résumé

Dans la région du plateau de Mostaganem, dans la wilaya de Mostaganem (Algérie), l'exploitation des eaux souterraines est indispensable, afin de subvenir aux besoins en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation de la population.

Le climat de la wilaya de Mostaganem se caractérise par une variabilité des précipitations et des pluies torrentielles fréquentes provoquant une concentration rapide des eaux et des écoulements. L'étude de l'infiltration des eaux de pluies dans la nappe du plateau de Mostaganem et l'évaluation de la recharge de cette nappe sont essentielles pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines dans cette région.

Ce mémoire présente une étude pour l'évaluation de la recharge réelle de la nappe du plateau de Mostaganem. Cette étude est basée sur l'analyse de plusieurs facteurs régissant l'infiltration des eaux de pluies, à savoir: lithologie, pente, type de sol, réseau hydrographique. Grâce à l'outil SIG, cette évaluation est faite en prenant en compte la quantité des précipitations et leur l'infiltration.

L'agrégation des différentes couches de paramètres spatialisés a permis d'établir une carte synthèse de la recharge réelle de la nappe du plateau de Mostaganem. Cette zone se caractérise par une infiltration globale de 89 mm/an.

Mots-clés : Eaux souterraines, recharge, infiltration, système d'information géographique, analyse spatiale

Abstract

In the Mostaganem Plateau region of the Mostaganem wilaya (Algeria), groundwater mining is essential to meet the water needs of agriculture, industry and drinking water for the population .

The climate of the wilaya of Mostaganem is characterized by a variability of precipitation and frequent torrential rains causing a rapid concentration of water and runoff. The study of the infiltration of rainwater into the Mostaganem Plateau and the assessment of the recharge of this water table are essential for the exploitation and management of groundwater in this region.

This paper presents a study for the evaluation of the actual recharge of the Mostaganem plateau area. This study is based on the analysis of several factors governing the infiltration of rainwater, namely: lithology, slope, soil type, hydrographic network. Using the GIS tool, an assessment of the recharge is made, taking into account the amount of precipitation and their infiltration.

The aggregation of the different layers of spatial parameters made it possible to establish a synthesis map of the actual recharge of the Mostaganem plateau. This zone is characterized by an overall infiltration of 89 mm / year.

Keywords: Groundwater, recharge, infiltration, geographic information system, spatial analysis.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents.

Spécialement ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A ma famille, mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A tous mes amis.

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Mme.DEKKICHE H. pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres de jury : M.DARI O., professeur Univ. D'Oran 2, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury et accepter de bien vouloir juger ce travail; à Mme. BELKHEIRE K. pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Je tiens à remercier également tout le personnel du département des sciences de la terre de l'université d'Oran 2 pour leur aide et les conseils qu'elles m'ont prodigués avec une disponibilité jamais démentie tout au long de mes études.

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. Eaux souterraines et recharge

I.1. Introduction.....	3
I.2. Gestion de l'eau en Algérie.....	3
I.3. Les eaux souterraines	4
I.3.1. Définition	4
I.3.2. L'utilisation des eaux souterraines	5
I.3.3. Types de nappes d'eaux souterraines	5
I.3.4. Nappes phréatiques	5
I.3.5. Techniques générales de captage des eaux souterraines	6
I.4. Recharge des nappes souterraines	8
I.4.1. Définition de la recharge	8
I.4.2. Types de recharge	8
I.4.3. Paramètres influençant la recharge	9
I.4.4. Méthodes d'estimation de la recharge	11
I.4.5. Importance de l'estimation de la recharge	15

Chapitre II : Système d'information géographique

II.1. Introduction	17
II.2. Définition	17
II.3. Historique des SIG	18
II.4. Composantes d'un SIG	19
II.5. Informations SIG et modes de représentation	21
II.6. Les principales fonctions	22
II.7. Logiciels SIG.....	24
II.8. Logiciel ArcGIS	24

CHAPITRE III : MISE EN OEUVRE ET APPLICATION

III.1. Introduction	26
III.2. Zone d'étude.....	26
III.2.1. Localisation du plateau de Mostaganem	26
III.2.2. Morphologie du plateau de Mostaganem	28
III.2.3. Hydroclimatologie	28
III.2.4. Lithostratigraphie et structure	29
III.2.5. Hydrogéologie	31
III.3. Méthodologie de l'étude	33
III.4. Carte synthèse de recharge de la nappe du plateau de Mostaganem.....	40
III.4.1. Classes d'infiltration.....	40
III .4.2. Volume précipité.....	41
III.4.3.Volume infiltré	42
III -5- Conclusion	46
Conclusion générale	42
Bibliographie.....	47

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. L'eau souterraine	4
Figure I.2. Types de nappes d'eaux souterraines	5
Figure I.3. Ouvrages de captage des eaux souterraines	8
Figure II.1. Composantes d'un SIG.....	21
Figure II.2. Présentation du logiciel ARCINFO	25
Figure III.1. Localisation du plateau de Mostaganem	27
Figure III.2. Carte géologique du plateau de Mostaganem (Gauchez 1981)	30
Figure III.3. Carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem (DEMRH 1974).....	32
Figure III.4. Principaux facteurs régissant l'infiltration	33
Figure III.5. Lithologie du plateau de Mostaganem	34
Figure III.6. Type de sol du plateau de Mostaganem	35
Figure III.7. Les pentes du plateau de Mostaganem.....	36
Figure III.8. Effets entre les paramètres	39
Figure III.9. Carte des classes d'infiltration du plateau de Mostaganem	41
Figure III.10. Carte synthèse de la recharge en eaux souterraines du plateau de Mostaganem.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Description hydrogéologique des facteurs influençant la recharge	10
Tableau I.2. Inventaire d'études visant à comparer différentes méthodes d'estimation de la recharge au cours des 20 dernières années	14
Tableau I.3. Méthodes d'estimation de la recharge	15
Tableau III.1. Différentes classes de lithologie	34
Tableau III.2. Classification des types de sol	35
Tableau III.3. Classes de pente	36
Tableau III.4. Classes de densité de drainage.....	37
Tableau III.5. Échelle des cotes.....	37
Tableau III.6. Valeurs des cotes pour tous les paramètres	38
Tableau III.7. Les indices d'infiltration et les taux de contribution	40
Tableau III.8. Classes d'infiltration du plateau de Mostaganem.....	41
Tableau III.9. Stations pluviométriques du secteur de Mostaganem	42

Introduction

générale

Introduction générale

Les eaux souterraines constituent une ressource vitale lorsqu'il s'agit de faire face aux besoins en eau douce des collectivités. La croissance démographique est susceptible de faire augmenter la population mondiale; de plus en plus d'eau souterraine sera donc nécessaire pour l'agriculture, l'industrie et la consommation humaine. L'évaluation de la recharge des nappes phréatiques est donc indispensable pour une gestion rationnelle et une exploitation optimale des eaux souterraines.

La wilaya de Mostaganem est caractérisée par un climat méditerranéen à caractère semi-aride. Les précipitations étant faibles, cette région dispose de ressources en eau renouvelables limitées. Face à cette situation, établir une évaluation et asseoir une gestion optimale des ressources en eaux souterraines dans cette zone sont devenues indispensables. Afin d'y parvenir, les gestionnaires de l'eau ont besoin d'informations très précises sur les conditions de réalimentation et d'exploitation au niveau de chaque bassin hydrogéologique.

Néanmoins, L'évaluation de la recharge des nappes d'eau souterraine est sans aucun doute l'un des paramètres les plus pertinents mais aussi le plus difficile à estimer et diverses approches ont été envisagées (Sophocleous, 2004).

Dans la présente étude on propose une analyse spatiale pour l'évaluation de la recharge réelle du plateau de Mostaganem. Cette étude repose sur la définition des paramètres régissant l'infiltration, leurs degrés d'influence et les relations éventuelles qui existent entre eux. Chaque facteur étant étudié indépendamment, et au final, tous les paramètres seront intégrés et compilés pour aboutir à une carte-synthèse de la recharge réelle.

Tous les paramètres régissant l'infiltration présentent une composante spatiale, de ce fait, l'information véhiculée par ces paramètres peut être stockée, analysée et visualisée à l'aide d'un Système d'Information Géographique. En effet, grâce à l'outil SIG, le traitement, des cartes topographiques, géologiques, hydrogéologique et l'analyse des données sur les précipitations de la région d'étude a permis de dégager différentes couches d'informations spatialisées et classifiées selon le degré d'infiltration des eaux de pluies, à savoir: la lithologie, la pente, le type de sol et le réseau hydrographique. L'agrégation de ces différentes couches de données, a permis d'établir une carte synthèse de la recharge réelle du plateau de Mostaganem.

L'organisation de ce mémoire est faite comme suit :

Chapitre I: il présente des généralités sur les eaux souterraines, leur gestion et leurs techniques d'exploitation. Les différentes méthodes d'évaluation de la recharge seront également présentées dans ce chapitre.

Chapitre II : il présente des généralités sur les systèmes d'informations géographiques (SIG). Une présentation du logiciel ArcGis, utilisé dans cette étude, est faite à la fin de ce chapitre.

Chapitre III : il présente la partie application et mise en oeuvre de la méthode d'évaluation de la recharge des eaux souterraines au niveau de la zone du plateau de Mostaganem. Ce chapitre présente, non seulement, les paramètres régissant la recharge des nappes, mais, il présente aussi la méthode d'analyse spatiale (superposition pondérée) proposée pour l'établissement de la carte synthèse de la recharge réelle du plateau de Mostaganem.

Chapitre I :

Eaux souterraines et

recharge

I.1. Introduction

Au cours des siècles passés, les utilisations humaines de l'eau n'ont eu aucune incidence sur la disponibilité de cette ressource naturelle. Avec le monde moderne, les aménagements et la consommation de l'eau par les êtres humains ont transformé le régime des eaux et perturber leurs fonctions naturelles.

L'ONU (Organisation des Nations unies) appelle, à l'avant-veille de la journée mondiale sur l'eau, à économiser cette précieuse ressource. Sans quoi le monde devra faire face à un déficit hydrique de 40 % dès 2030 (Martine V, 2015) Sur Terre, l'eau douce est relativement abondante mais elle n'est pas bien répartie entre les différents pays ou régions du globe. Et, à mesure que la population mondiale augmente, les besoins en eau de l'humanité ne cessent de croître. L'eau pourrait devenir, au XXI^e siècle, un enjeu politique et économique comparable à ce que fut, par exemple, le pétrole durant les dernières décennies (le centre d'information sur l'eau, 2013).

En 1950, la ressource mondiale en eau était estimée à 17 000 m³ par personne et par an. Du fait de la forte croissance démographique couplée à l'industrialisation, l'urbanisation et l'intensification agricole, la ressource en eau renouvelable et disponible n'était plus que de 7 500 m³ par personne et par an en 1995. Elle devrait chuter à moins de 5 100 m³ en 2025 (source : Eurostat 2002).

I.2. Gestion de l'eau en Algérie

La gestion de l'eau en Algérie pose un sérieux problème aux autorités et les ressources disponibles sont en dessous des besoins. La vétusté des réseaux d'adduction et la capacité de stockage déficiente entravent la bonne distribution de l'eau aux consommateurs. La dotation journalière par habitant reste faible par rapport aux normes internationales, car les instruments de gestion de l'eau ne sont pas efficaces.

L'Algérie compte 17 bassins-versants. Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques. La connaissance des ressources en eau est la condition nécessaire pour une bonne gestion. Les instruments de gestion sont un

outil indispensable pour l'organisation des institutions juridiques, économiques et administratives de ladite gestion (Erhard Cassegrain & Margat, 1979).

I.3. Les eaux souterraines

I.3.1. Définition

Quand la pluie tombe sur le sol, une partie coule le long de la surface de la terre vers des ruisseaux, rivières ou des lacs et peut hydrater le sol. Une partie de cette eau est utilisée par la végétation, une autre partie s'évapore et retourne à l'atmosphère.

Une partie de l'eau s'infiltré aussi dans le sol, traverse la zone non saturée et atteint la nappe phréatique.

L'eau souterraine est contenue dans ce qu'on appelle les « aquifères ». Un aquifère est une formation géologique, ou une partie de celle-ci, constituée d'un matériau perméable capable de stocker des quantités importantes d'eau. Les aquifères peuvent être constitués de différents matériaux : sables et graviers non consolidés, roches sédimentaires perméables telles que les grès ou calcaires, roches volcaniques et cristallines fracturées... Les eaux souterraines sont (naturellement) rechargées par l'eau de pluie et la fonte des neiges ou par l'eau qui fuit à travers le fond de certains lacs et rivières.

Les eaux souterraines peuvent également être rechargées lorsque les systèmes d'approvisionnement en eau fuient et que les cultures sont irriguées avec plus d'eau que nécessaire.

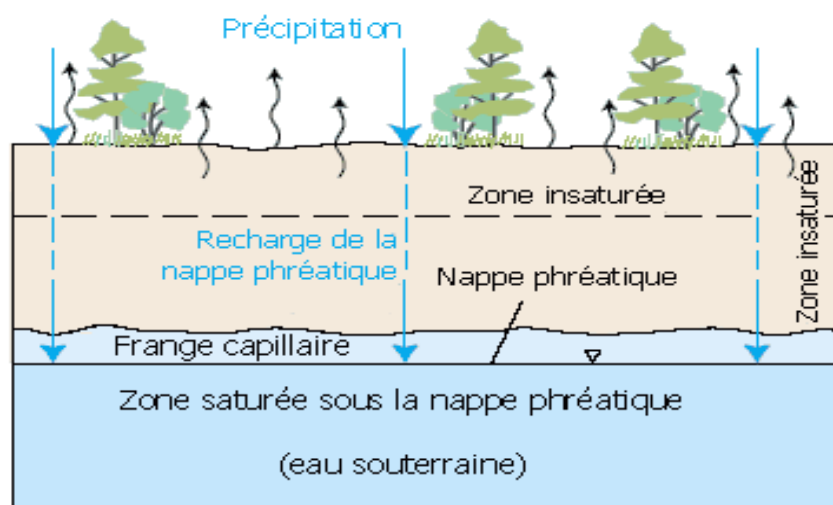


Figure I.1. L'eau souterraine

I.3.2. L'utilisation des eaux souterraines

Les eaux souterraines offrent des ressources avantageuses pour de nombreux utilisateurs. Elles forment souvent la principale source d'approvisionnement en eau potable (Margat J, 1989). Les eaux souterraines contribuent aussi dans une proportion appréciable aux approvisionnements en eau industrielle dans les pays développés et constituent la ressource locale quasi exclusive pour l'irrigation et l'élevage en zones arides (Margat J, 1989).

I.3.3. Types de nappes d'eaux souterraines

Il existe deux types de nappes d'eaux souterraines:

- Les **nappes libres** où la pression de l'eau, à la surface de la nappe, est égale à la pression atmosphérique. C'est le cas lorsque la roche réservoir affleure à la surface.
- Les **nappes captives** où la pression de l'eau, à la surface de la nappe, est supérieure à la pression atmosphérique. C'est le cas lorsque la roche réservoir est surmontée d'une couche imperméable. Le niveau d'eau ne pouvant dépasser le haut du réservoir, l'eau se met sous pression. La pression peut parfois être suffisante pour que l'eau jaillisse naturellement en surface dans un forage atteignant cette nappe (**Syndicat mixte d'études et de gestion de la ressource en eau du département de la Gironde**).

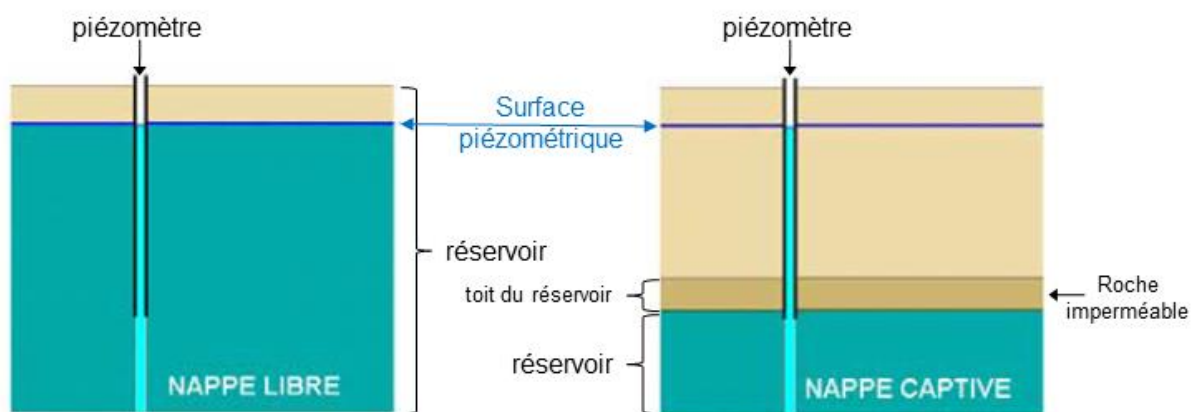


Figure I.2. Types de nappes d'eaux souterraines

I.3.4. Nappes phréatiques

L'expression « nappe phréatique » est utilisée couramment pour parler de toutes les nappes d'eau souterraines. Néanmoins le mot phréatique vient du grec ancien, phréar : « puits ». Au sens strict, les nappes phréatiques sont les premières nappes d'eau souterraine qu'on trouve

dans le sous-sol (les plus proches de la surface), ce sont celles qui sont réalimentées directement par les eaux de pluie qui peuvent traverser le sol et la roche en dessous, et qui sont le plus souvent exploitées par les puits ordinaires. Ce sont ces nappes qui alimentent le plus souvent les **puits à eau** et les **sources** (Wikidia, 2016).

Quand on creuse un puits, on fait un trou assez profond pour atteindre le niveau de la nappe. Parfois et à certains endroits, le niveau de la nappe est près de la surface ou même à la surface du sol. Le sol est alors trempé et l'eau ne peut plus s'évacuer en s'infiltrant tant que la nappe est aussi haute. À l'inverse, la sécheresse et le pompage de l'eau des nappes phréatiques font baisser leur niveau, naturellement ou artificiellement. Il n'y a pas d'évaporation dans le sous-sol et le plus souvent, les nappes sont hors de portée des racines des arbres. L'eau n'en sort donc qu'en s'écoulant lentement vers des points bas, des sources ou des cours d'eau. Cela fait que le niveau des nappes varie naturellement en fonction des événements météorologiques. Le niveau d'eau dans un puits est normalement le même que celui de la nappe phréatique dans laquelle ce puits prend de l'eau. On peut donc y voir les variations de niveau de la nappe, qui sont parfois de plusieurs mètres en hauteur. Le niveau d'une même nappe phréatique est à peu près le même en différents endroits, mais comme l'eau ne se déplace pas aussi facilement dans la roche que dans un lac, le niveau du haut de la nappe n'est pas plat comme la surface d'un lac : il peut être en pente (vers là où l'eau sort) ou bombé, etc.

Les nappes phréatiques sont à la fois les plus actives naturellement (des quantités d'eau assez importantes y arrivent et en sortent chaque année) et les plus exploitées par l'homme (Wikidia, 2016).

I.3.5. Techniques générales de captage des eaux souterraines

Le choix de la technologie de captage des eaux souterraines est à adapter en fonction non seulement de l'hydrogéologie (géométrie de l'aquifère, paramètres hydrodynamiques, potentialités) mais également de contraintes externes : topographie, hydrographie, risques de salinisation, de transfert de pollution depuis la surface, occupation des sols, conditions d'exécution et d'équipement...etc.

Enfin, l'ouvrage doit pouvoir être réalisé dans des conditions économiquement supportables. Il existe différentes techniques de captage des eaux souterraines: puits, forages, galeries et tunnels...etc., voir **figure I.3**.

- **Puits:** un puits est un trou vertical de large diamètre (pouvant atteindre plusieurs mètres), peu profond (quelques mètres) creusé dans la terre afin d'extraire l'eau des premiers niveaux

aquifères. Dans les milieux volcaniques insulaires, les puits sont réalisés en zone littorale et exploitent les eaux de la nappe superficielle.

- **Forage:** à la différence d'un puits, est un trou vertical profond (de plusieurs dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres) et de diamètre plus restreint. Il est creusé par un procédé mécanique à moteur (foreuse) en terrain consolidé ou non.

Les ouvrages verticaux sont les plus utilisés et les plus adaptés pour exploiter des aquifères poreux et relativement étendus. La majorité des aquifères fissurés sont également exploités à l'aide de ces ouvrages.

- **Galeries et tunnels :** Les **galeries** sont des petits **tunnels** creusés dans la roche de manière à traverser et donc à drainer une nappe d'eau souterraine. Ces ouvrages sont généralement subhorizontaux et de sections de l'ordre de 1.80 à 2 mètres de hauteur et 1 à 2 mètres de large. Les eaux souterraines sont collectées puis canalisées par une galerie où des **drains horizontaux ou subhorizontaux** complémentaires qui viennent parfois se brancher à la galerie. La longueur de ces galeries est variable : de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.
- **Autres techniques :** Il existe d'autres systèmes de captage tels que des tranchées drainantes de très grande longueur (plusieurs kilomètres) qui sont conçues pour amener l'eau d'un aquifère poreux, gravitairement en surface. On les appelle des **foggaras** (Algérie), **khettaras** (Maroc) ou encore **qanat** (Iran).

La pointe filtrante est un autre type de captage des eaux souterraines. c'est un ouvrage de captage peu profond (8 m maximum) réalisé généralement dans les sols sableux. Ce type de captage est aménagé en enfonçant manuellement ou mécaniquement le tubage dont le diamètre intérieur varie de 2,5 à 5 cm (8 cm au plus). L'extrémité inférieure constitue la crépine par laquelle s'effectue l'aspiration de l'eau. Les pointes filtrantes, isolées ou en batteries sont couramment employées dans le domaine des travaux publics pour le rabattement des nappes mais peu usitées pour l'exploitation des eaux souterraines. Le captage par pointes filtrantes permet de répartir les prélèvements sur une plus grande surface et de diminuer les rabattements. Sa mise en œuvre, d'un coup de revient modeste, ne nécessite ni matériel complexe, ni main d'œuvre qualifiée.

Le forage horizontal est quand à lui une technique permettant de faire passer des canalisations et des câbles sous des obstacles (chaussées, bâtiments, cours d'eau...) sans avoir à réaliser de tranchées. Grâce au forage horizontal, des ressources qu'il était difficile d'atteindre en forage

classique du fait d'obstacles géologiques (lithologies rebelles) ou de la structure de l'aquifère, deviennent accessibles (BRGM, 2008).

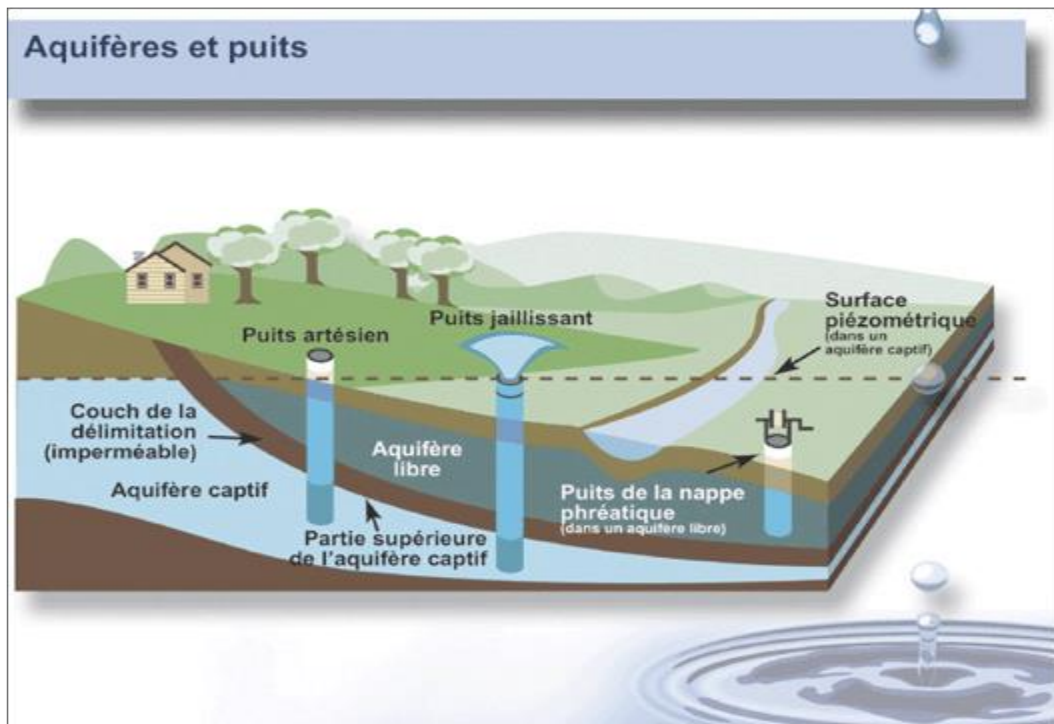


Figure I.3. Ouvrages de captage des eaux souterraines

I.4. Recharge des nappes souterraines

I.4.1. Définition de la recharge

De façon générale, la recharge correspond à la quantité d'eau qui arrive à la nappe et qui forme un ajout au réservoir d'eau souterraine (Scanlon *et al.*, 2002; Vries and Simmers, 2002). Une partie des précipitations s'infiltrer et recharge l'aquifère. Une part des précipitations peut également ruisseler (en surface ou subsurface) et/ou s'évapotranspirer, Il existe également des échanges entre les eaux souterraines et les cours d'eau.

Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à celle du cours d'eau les eaux souterraines se déchargent vers le cours d'eau. Inversement lorsque la charge hydraulique du cours d'eau dépasse celle de l'aquifère, le cours d'eau recharge le réservoir d'eau souterraine.

I.4.2. Types de recharge

On distingue deux types de recharge de l'aquifère:

- La recharge directe, qui provient des précipitations et de l'irrigation et qui se produit sur de grandes étendues spatiales.
- La recharge indirecte plus locale qui se fait à partir de la surface topographique par des rivières ou des lacs ou encore à partir du ruissellement de surface (infiltration des eaux de ruissellement venant du bassin plus en amont).

On différencie également la recharge potentielle de la recharge réelle ou nette. La première représente la quantité totale d'eau qui s'est infiltrée et qui ne rejoint pas nécessairement la nappe. La recharge réelle représente plutôt la quantité d'eau qui atteint la nappe après avoir soustrait des précipitations les phénomènes de ruissellement hypodermique, d'*ETR* (évapotranspiration réelle) et autres processus induisant une perte.

I.4.3. Paramètres influençant la recharge

Différents paramètres influencent directement la recharge, à savoir: le climat, la topographie (la pente), le sol, la végétation et la géologie (nature lithologique, perméabilité des roches...), le réseau hydrographique... etc.

Le tableau **I.1** résume les différents facteurs et propriétés hydrogéologiques influençant le potentiel de recharge de l'aquifère.

La recharge varie aussi spatialement selon l'épaisseur de la zone vadose (zone non saturée) (Flint *et al*, 2002).

En région humide, la recharge est principalement limitée par la capacité de l'aquifère à stocker ou à transporter l'eau, alors qu'en région plus aride la recharge dépend surtout des événements pluviométriques de haute intensité, seuls moments où les précipitations excèdent l'*ETR* (Scanlon *et al*, 2002; Vries & Simmers, 2002; Misstear, 2000).

Globalement la recharge est favorisée lorsque la végétation est pauvre (faible *ETR*), les précipitations sont importantes et bien distribuées sur l'année hydrologique, le sol est perméable (à grains grossiers ou à socle rocheux fracturé ou à faille proche de la surface), et lorsque la pente du terrain est faible (limite le ruissellement).

Tableau I.1. Description hydrogéologique des facteurs influençant la recharge

Facteurs	Propriétés hydrogéologiques influençant le potentiel de recharge
Lithologie	Compacité de la roche, état d'altération, présence de diaclase et de joint sur les roches sub-affleurantes ou affleurantes. Les zones caractérisées par des roches moins compacte et une arène grenue épaisse sont plus favorables à l'infiltration que les roches compactes (J.Krishnamurthy et al., 1996,2000).
Drainage	Densité de drainage en longueur totale ou en nombre de drains par unité de surface. En milieu de socle, la fracturation intervient fortement assez souvent sur l'orientation des segments du réseau hydrographique et sa forme générale (surtout lorsque les pentes sont fortes et les altérites peu épaisses). Dans ce cas, le réseau hydrographique indiquerait la présence de fractures créant des voies préférentielles d'infiltration. Le réseau de drainage est utilisé comme critère d'évaluation des propriétés de recharge des aquifères fracturés par de nombreux auteurs, comme J.Krishnamurthy et al. (1996,2000), A.Shaban et al. (2006).
Occupation du sol	Densité et répartition géographique de la couverture végétale, présence de surfaces imperméables (bâtiments, industries, remblais, routes, etc.) par son influence sur l'état de surface et la structure du sol, la couverture végétale freine le ruissellement et favorise l'infiltration. En revanche, elle peut restituer beaucoup d'eau à l'atmosphère, par évaporation directe de l'eau interceptée par le feuillage et par transpiration de celle puisée par les racines. Mais elle est le plus souvent favorable à la recharge.
Type de sol et épaisseur	Granulométrie et épaisseur des sols. En milieu de socle fracturé, la pénétration de l'eau dans les couches souterraines dépend essentiellement de la teneur en argile et l'épaisseur des sols. Les études de terrain et de laboratoire basé sur des approches hydrauliques et isotopiques montrent que les réponses rapides de la nappe se déroulent dans les secteurs à épaisseur de sol faible (A.Rodhe et N.Bockgard, 2006 ; C.Bhuiyan et al., 2009). En revanche, si les formations superficielles sont épaisses, cela peut entraîner une diminution ou une retardation du processus d'infiltration, ce qui pourrait accroître les effets de l'évapotranspiration
Pente	Le potentiel de recharge des aquifères est inversement proportionnel à la valeur des pentes. Sur pentes fortes, le ruissellement est favorisé, au détriment de l'infiltration. A l'inverse les pentes faibles sont favorisés à l'infiltration (J.Krishnamurthy et al., 1996,2000 ; J.Ghayoumian et al., 2005).

I.4.4. Méthodes d'estimation de la recharge

De nombreuses méthodes permettent l'évaluation de la recharge d'un aquifère, à savoir:

- Des approches de bilan hydrique, basées sur la loi de conservation de la masse dans le cycle hydrologique sont couramment employées. La différence entre les entrées et les sorties d'eau dans le système équivaut à la variation de stockage d'eau dans les réservoirs.

La recharge est ainsi obtenue par différence, en calculant tous les autres termes. La manière la plus courante de réaliser un bilan hydrologique est l'utilisation de modèles hydrologiques comme HYDROTEL, SWAT, HELP, CEQUEAU ou MOHYSE [Arnold & Allen, 1999 ; Lefebvre et al., 2009, Croteau et al., 2010; Larocque et al., 2010].

- L'infiltrométrie et la lysimétrie (Heppner et al., 2007; Risser et al., 2009) constituent des mesures directes et locales de l'infiltration verticale en fonction du temps. Réalisées à différents endroits, ces techniques permettent d'estimer les variations spatiales de la recharge. Cependant, ces installations induisent certaines perturbations du sol et de l'écoulement qui viennent modifier le processus de la recharge. De plus, de telles approches engendrent des coûts élevés d'investigation.
- L'estimation de la recharge par le suivi du niveau de la nappe est la plus utilisée, notamment en contexte de nappe peu profonde. Elle se veut simple, facile à utiliser et peu coûteuse (Healy & Cook, 2002; Yin, 2011). La limite de cette méthode repose sur la difficulté d'évaluer le coefficient d'emménagement spécifique, qui contrôle directement la valeur estimée de la recharge. Cette méthode considère également que toute montée du niveau d'eau de la nappe est due à la recharge. Cependant, les phénomènes de pompage ou l'évapotranspiration, viennent principalement remettre en cause cette hypothèse.
- L'analyse des hydrogrammes des cours d'eau permet d'évaluer la contribution des eaux souterraines aux cours d'eau. L'étude des hydrogrammes consiste à séparer et à interpréter le débit de base ou à analyser les périodes de récession. L'estimation de la recharge est alors possible en supposant que la décharge des eaux souterraines équivaut à la recharge (Brodie & Hostetler, 2005; Bredehoeft, 2007).
- Des méthodes analytiques sont également disponibles. Une de ces méthodes basée sur un modèle d'écoulement horizontal de Dupuit-Forchheimer (Dupuit, 1863) a été testée

afin d'évaluer la recharge régionale d'un aquifère à nappe libre de socle cristallin du Bouclier canadien (Chesnaux, 2013). Cette approche nécessite un suivi piézométrique sur un profil horizontal et une échelle de temps uniforme. Les hypothèses de base sont cependant limitantes (homogénéité et isotropie du système aquifère, référentiel de base de l'aquifère) et jouent un grand rôle dans la détermination de la valeur de la conductivité hydraulique et de la recharge.

- Il existe aussi les méthodes de traçage (Vries & Simmers, 2002; Flint et al 2002). Elles sont généralement coûteuses et appliquées à de petites échelles spatiales (Scanlon et al., 2002). Les mesures isotopiques informent plutôt sur l'origine de l'eau qui contribue à la recharge. Quantifier la recharge par ces outils est plus difficile. Le traçage par la chaleur est très coûteux de par le matériel nécessaire à l'investigation. Des traceurs historiques comme le couple tritium/hélium, ou les CFCs (Chlorofluorocarbones) ainsi que des traceurs environnementaux (CMB, Chlorides Mass Balance ou bilan de masse des chlorures) sont aussi utilisés pour définir l'âge de l'eau et de ce fait la recharge, de façon locale et à long terme (sur les 50 dernières années).
- La modélisation en zone non saturée cherche à résoudre l'équation de Richards (Richards, 1961). Les logiciels les plus utilisés sont UNSATH, VS2DT, HYDRUS 2D (Scanlon et al., 2002). Les modèles numériques construits à partir de ces logiciels requièrent des observations de terrain afin d'être valides. L'aire d'étude est restreinte (<100 m²). Scanlon (2002) souligne le fait que l'imprécision de la valeur de conductivité hydraulique et l'hystérésis entre la conductivité hydraulique, la teneur en eau et la charge de pression sont à l'origine d'une importante incertitude.
- La modélisation numérique en zone saturée constitue également un outil intéressant très utilisé (Gogolev, 2002 ; Gandolfi et al. 2006; Carrera-Hernandez et al., 2012). La valeur de recharge est le plus souvent obtenue par le calage d'un modèle numérique (Sanford, 2002). La fiabilité de l'estimation de la recharge est fortement liée à la conductivité hydraulique. Cependant, cette dernière méthode varie souvent de plusieurs ordres de grandeurs. La valeur de la recharge estimée par le modèle numérique n'est donc pas unique. En régime permanent, les valeurs de recharge sont fixées. Le régime transitoire permet de simuler les variations temporelles de la recharge pour des valeurs de conductivité hydraulique fixes. Cette approche permet donc de mieux contraindre la valeur de recharge (Scanlon et al., 2002).

Une section spéciale sur la thématique de la recharge est parue en 2002 dans la revue *Hydrogeology Journal*. Elle présente les différentes problématiques ainsi que les avancées des diverses méthodes d'estimation de la recharge. L'article de Scanlon (2002) constitue notamment un bon guide sur les différentes techniques existantes et leur spécificité. Il recense les critères à prendre en compte ainsi que l'approche à adopter afin de choisir la méthode la plus adaptée à la zone d'étude sélectionnée.

Il est cependant difficile de choisir parmi ces nombreuses méthodes la plus appropriée pour un système aquifère donné. Les paramètres climatiques, géologiques et géomorphologiques contrôlent largement la recharge à tout point de vue et jouent donc un grand rôle concernant le choix de la technique à adopter (Gogolev 2002 ; Scanlon *et al.*, 2002).

Il ne faut pas non plus négliger le niveau de complexité de réalisation des différentes méthodes, leur coût, leur durée d'investigation, leur efficacité selon la zone d'étude ou encore la disponibilité des données en termes de qualité et de quantité (Yin *et al.*, 2011). Considérant les nombreux facteurs qui contraignent la recharge, cette dernière reste la composante du système eau souterraine la plus difficile à quantifier (Stephens, 2008).

Le tableau **I.2** et **I.3** présente un inventaire sur les études et les méthodes d'estimation de la recharge faites au cours des 20 dernières années.

Tableau I.2. Inventaire d'études visant à comparer différentes méthodes d'estimation de la recharge au cours des 20 dernières années.

Auteur	méthodes	lieux	Durée d'investigation (an)	climat
Sophocleous, 1991	1,2	USA (kansas)		Semi aride
Arnold et allen, 1999	3,4,6.1	USA(Mississippi)	30	Subtropical
Chen et lee, 2003	3,4	Chine (Taiwan)	57	Tropical
Flint et al., 2002	2,5,7,9.1,13,14	USA (Nevada)	Très variable selon les méthodes 27 à 33	Aride –Semi aride
Risser et al., 2005	1,3,4,6.2,9.2	USA (Pennsylvanie)		Aride
Coes et al., 2007	1,3,5,8	USA (Caroline du Sud)	1 à 17 selon les méthodes	Subtropical - Humide
Delin et al., 2007	1,4,6.4,8,9.3	USA (Minnesota)	5 à 59 selon les méthodes	Humide
Lee et al., 2006	1,2	Taiwan	Long terme	Tropical
Heppner et al., 2007	1,9.2	USA (Pennsylvanie)	6	Aride
Manghi et al., 2009	2	USA (Californie)	28	Aride
Laroque et al., 2010	3,6.6	Canada (Québec)	15	Humide
Croteau et al., 2010	6.2	Canada (Québec)	39	Humide
Yin et al., 2011	1,2,5	Chine (Ordo plateau)	4 à 24	Semi aride
Lie et al., 2011	1,6.3	Allemagne	11	Humide
Lefebvre et al., 2011	1,2,6.5	Canada (Québec)	9	Humide
Rivard et al., 2014	2,3,6.2,13	Canada (Québec)	30 à 93	Humide

Tableau I.3. Méthodes d'estimation de la recharge utilisée par les auteurs du Tableau I.2

Méthodes
1 WTF
2 Bilan hydrologique
3 Séparation d'hydrogrammes
4 Méthode RORA
5 Loi de Darcy
6 Modèle bilan hydrologique
6.1 SWAT
6.2 HELP
6.3 PROMET
6.4 RRR
6.5 CEQEAU
6.6 MOHYSE
7 Méthode de traçage
8 Datation de l'eau
9 Physique des sols
9.1 Sonde à neutrons
9.2 Lysimétrie
9.3 Bilan zone non saturée
13 Modélisation numérique
14 Approche empirique

I.4.5. Importance de l'estimation de la recharge

L'évaluation de la recharge permet dans un premier temps, à l'échelle d'un aquifère, d'estimer le renouvellement de la ressource en eau (Scanlon *et al.*, 2002). Il s'agit habituellement d'études menées sur une grande échelle spatio-temporelle. Cette estimation du stock d'eau souterraine disponible contribue à développer des stratégies d'exploitation durable de celle-ci, à court et a long terme.

A une échelle plus locale, l'estimation de la recharge permet une évaluation de la vulnérabilité des aquifères face aux contaminations. Les zones de recharge préférentielles sont vulnérables vis-à-vis des contaminants qui peuvent de ce fait migrer rapidement à travers la zone non saturée. A partir des études d'évaluation des zones de recharge préférentielles, des périmètres de protection des captages d'eau potable peuvent être définis.

Au contraire, localiser les zones de faible recharge permet d'évaluer les capacités d'un site de stockage potentiel pour le confinement de déchets (Flint *et al.*, 2002). Ceci requiert des informations plus détaillées sur la variation spatiale de la recharge et les écoulements préférentiels.

Chapitre II :

Systeme

d'information

géographique

II.1. Introduction

De nos jours, on assiste au développement de nombreux outils scientifiques et technologiques permettant d'aborder et de comprendre notre globe terrestre dans sa globalité. Parmi les technologies qui permettent de mieux étudier la terre et ses ressources naturelles, tels que l'eau, les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) qui jouent un rôle prépondérant.

En effet depuis les dernières années les SIG sont devenus parmi les meilleures techniques utilisées pour l'inventaire, la planification, la gestion et le développement des ressources naturelles grâce à leurs capacités de cartographie numérique et de suivi des phénomènes naturels. Les données multi-sources sont combinées entre elles et stockées dans une base de données relationnelle multi-logiciels qui va permettre leur manipulation et leur mise à jour.

Le SIG est considéré un parmi les meilleurs outils les plus utilisés actuellement. En effet, le premier avantage de ce dernier c'est qu'il est capable de rassembler dans une même base de données des informations autrefois dispersées. Les informations sont stockées, gérées et mises à la disposition de ceux qui en ont besoin. Dans le système que l'on se propose de mettre en place, pour une évaluation de la recharge potentielle d'un aquifère, l'innovation vient du fait d'introduire et de croiser des données venant des domaines très divers (Géologie, Géomorphologie, Hydrologie, Hydrogéologie, topographie,...).

Les possibilités d'analyse permettent de choisir des données de sources diverses et apportent une solution simple au traitement des données spatialement référencées ou non. Les résultats peuvent être présentés sur des cartes dont la représentation est automatisée (Boussema, 1994).

Les SIG peuvent fournir des éclaircissements sur des liens complexes que d'autres moyens ne permettent pas d'étudier ou d'observer facilement. Au lieu d'utiliser des cartes en deux dimensions, les logiciels SIG permettent de développer des vues en trois dimensions qu'on utilise par la suite dans des applications avancées, telles que la réalité virtuelle. Ces outils permettent aussi d'inspirer des approches globales en matière d'évaluation et de calcul des recharges potentielles des aquifères qui pourraient faciliter le développement de solutions aux grands problèmes de surexploitation des eaux souterraines.

II.2. Définition

Une constatation fréquente est la difficulté que l'on rencontre à définir un système d'information géographique. Il n'y a pas véritablement de définition officielle. En fait, le vocable SIG désigne à la fois :

- Le concept de chaîne de traitement numérique de l'information géographique.
- Les outils informatiques qui permettent de l'instrumenter.
- Et les applications qui sont construites avec cet outil.

Les définitions sont donc relativement générales pour ne pas perdre ce caractère polysémique. Une définition simple présente un SIG comme "un système pour collecter, stocker, vérifier, manipuler, analyser et restituer des données spatialement référencées à la surface de la Terre " (DoE, 1987).

Dans le même registre, un SIG est un "Système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer et de combiner, d'élaborer et de représenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace ", (Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, Strasbourg 1989).

Enfin, signalons l'existence d'un quasi synonyme, SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale), terme dominant au Québec, qui met l'accent sur l'aspect Système d'Information (SI), avec ses aspects structuration des données, organisation des moyens et ressources humaines, développement d'outils, sans référence à une thématique particulière. Enfin précisons que les SIG permettent de travailler sur trois catégories d'objets géographiques (points, lignes, polygones) et sur leur sémantique (attributs associés à chaque objet).

II.3. Historique des SIG

La première application SIG, souvent citée en épidémiologie, est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow. Il s'agit de l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il parvint à déterminer que c'était l'eau d'un certain puits qui était le foyer de contamination.

Dans les années 60, les cartes de l'Afrique de l'Est, trop nombreuses pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières, font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques (SIG).

L'avancée de l'informatique encouragée par la prise de conscience environnementale a permis l'usage des techniques et méthodes dans la science et l'aménagement du territoire. Le suivi, la gestion et la protection de la biodiversité sont également à l'origine de l'évolution des applications SIG. Depuis 1970, de nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires et collaboratives ont vu le jour.

Depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels SIG, développements des applications SIG, mise en réseau (bases de données distribuées, avec depuis les années 1990, des applications SIG sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition de « logiciels libres » ou d'outils dédiés aux pratiques coopératives ...

II.4. Composantes d'un SIG

Un Système d'Information Géographique est constitué de 5 composants majeurs :

II.4.1. Matériel

- **L'ordinateur:** Il s'agit d'une composante indispensable à un S.I.G et l'élément fondamental de cette composante reste l'ordinateur. Le S.I.G fonctionnent aujourd'hui sur une gamme très diversifiée d'ordinateurs: **des micro-ordinateurs** (PC ou Mac) **aux stations de travail** sous Unix et des serveurs de données aux ordinateurs de bureaux connectés en réseau ou utilisés de façon autonome.
- **Les périphériques:** Reliés à l'ordinateur, de multiples périphériques permettent d'assurer diverses fonctions et deviennent de plus en plus indispensables:
- **Le matériel d'acquisition des données:** scanner, table à digitaliser...
 - **le matériel de stockage des données:** disques durs, CD Rom, disquettes, DVD...
 - **Le matériel de visualisation des données:** écrans traditionnels, écrans plats, portables...
 - **Le matériel d'impression des données:** imprimantes, traceurs...

II.4.2. Logiciel

Le logiciel est une composante essentielle d'un S.I.G. Les logiciels S.I.G offrent une panoplie d'outils et de fonctionnalités qui permettent de stocker, d'analyser et d'afficher des données géographiques:

- **Acquisition** - les outils pour saisir, acquérir et manipuler des données,
- **Archivage** - les outils de gestion, de stockage et d'extraction des données,
- **Analyse**- les outils de requête, de transformation et d'analyse des données,

- **Affichage** - les outils de visualisation, d'affichage et de présentation des données,
- Et l'interface graphique afin de faciliter l'utilisation du logiciel par les utilisateurs.

II.4.3. Données

Ce sont certainement les composantes les plus importantes d'un S.I.G. Les données géographiques et les données tabulaires associées peuvent soit être constituées en interne, soit acquise auprès de producteurs de données.

II.4.4. Utilisateurs

Un S.I.G étant avant tout un outil, ce sont **ses utilisateurs (et le personnel qui entretient et gère le système)** qui lui permettent d'exister et de donner toute l'efficacité dont il peut être porteur. Il est constitué de:

- Techniciens et ingénieurs chargés de la conception, de l'entretien et de la gestion du S.I.G.
- Techniciens utilisant quotidiennement le S.I.G dans leur travail.
- Décideurs utilisant le S.I.G comme moyen d'aide à la décision.

Cependant, avec le développement des S.I.G sur Internet, le nombre d'utilisateurs potentiels ou réels de S.I.G augmente chaque jour.

II.4.5. Méthode

La mise en œuvre et l'utilisation d'un S.I.G ne peut s'effectuer sans l'application de méthodes, de règles et de procédures. Ces méthodes permettent une utilisation rigoureuse et cohérente du matériel, des logiciels et des données du S.I.G par l'ensemble des utilisateurs et cela afin de répondre aux objectifs fixés au préalable dans tout projet.

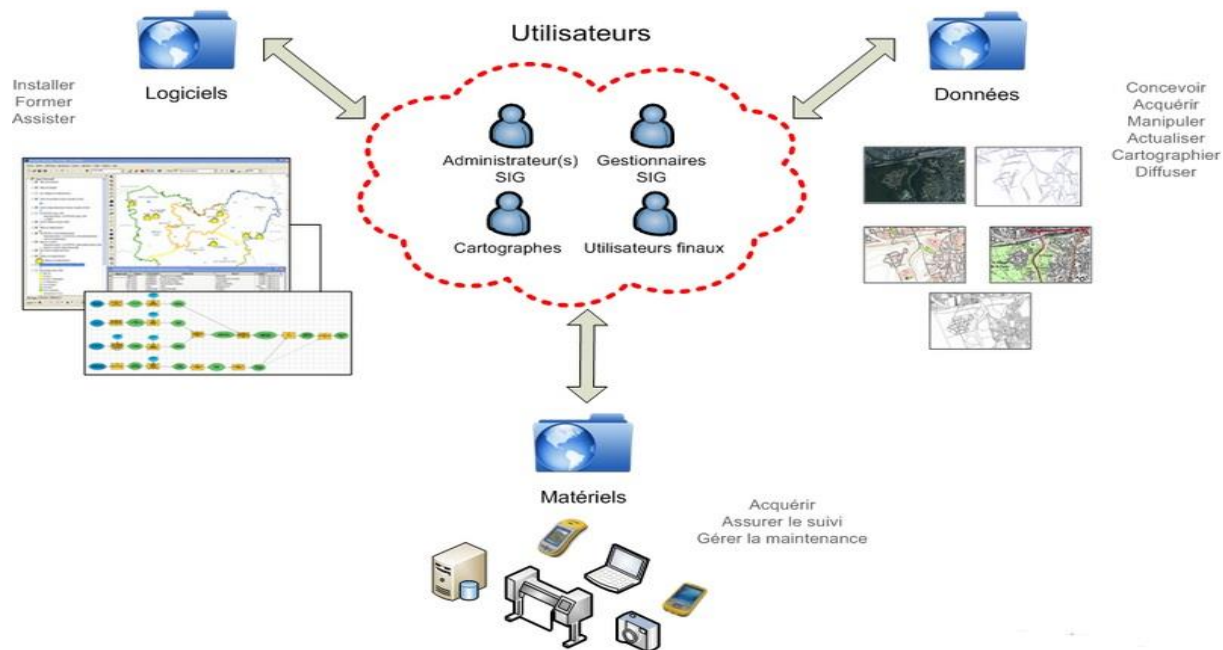


Figure II.1. Composantes d'un SIG

II.5. Informations SIG et modes de représentation

Aujourd'hui, le rôle d'aide à la prise de décision SIG est mis en avant par les fonctionnalités de traitement d'informations spatiales. On entend par « informations » ou « données spatiales », les informations et données liées à tous les acteurs, phénomènes et activités sur terre et dans l'espace au sens large du terme (Bourough, 1986).

Les objets dont les coordonnées sont connues peuvent être un point (un point sélectionné sur un terrain, une superficie polluée, un habitat de ménage ou encore l'endroit de déversement des déchets d'un hôpital), un réseau (des voies de transport, un canal d'irrigation des eaux, des tuyaux d'alimentation en eau potable, le réseau de rivières), une région (une unité administrative : hameau, commune, district, province ou ville, le pays, la région, un quartier d'habitation, une zone industrielle). Les objets disposant de coordonnées sont représentés sous deux formes graphiques :

Vecteur (point, ligne, zone) et **maillage** (raster).

Le vecteur est le mode le plus fréquent, notamment afin de représenter les données cartographiques.

II.6. Principales fonctions d'un SIG

II.6.1. Saisie

Avant d'utiliser des données papier dans un Système d'Information Géographique (SIG), il est nécessaire de les convertir dans un format informatique. Cette étape essentielle depuis le papier vers l'ordinateur s'appelle digitalisation. Les SIG modernes sont capables d'automatiser complètement ces tâches pour des projets importants en utilisant la technologie des scanners. D'autres projets moins importants peuvent se contenter d'une phase de digitalisation manuelle (table à digitaliser). Aujourd'hui de nombreuses données géographiques sont disponibles dans des formats standards lisibles par les SIG. Ces données sont disponibles auprès de producteurs de données et peuvent être directement intégrées à un SIG.

II.6.2. Manipulations

Les SIG intègrent de nombreux outils permettant de manipuler toutes les données pour les rendre cohérentes et ne garder que celles qui sont essentielles au projet. Ces manipulations peuvent, suivant les cas n'être que temporaires afin de se coordonner au moment de l'affichage ou bien être permanentes pour assurer alors une cohérence définitive des différentes sources de données.

II.6.3. Gestion

Si pour les petits projets il est envisageable de stocker les informations géographiques comme de simples fichiers, il en est tout autrement quand le volume de données grandit et que le nombre d'utilisateurs de ces mêmes informations devient important.

Dans ce cas il est essentiel d'utiliser un SGBD (Système de Gestion de Bases de Données) pour faciliter le stockage, l'organisation et la gestion des données. Un SGBD n'est autre qu'un outil de gestion de la base de données. Il existe de nombreux types de SGBD, mais en Système d'Information Géographique, le plus utilisé est le SGBDR (Système de Gestion de Bases de Données Relationnel). Les données y sont représentées sous la forme de tables utilisant certains champs comme lien. Cette approche qui peut paraître simpliste offre une souplesse et une flexibilité sans équivalent permettant aux SIG de s'adapter à tous les cas de figure.

II.6.4. Interrogation et analyses

Les SIG procurent à la fois des outils simples d'interrogation et de puissantes solutions d'analyses accessibles à tous les publics. Ils disposent de nombreux et puissants outils d'analyse.

II.6.5. Analyse spatiale

L'intégration de données au travers des différentes couches d'information permet d'effectuer une analyse spatiale rigoureuse. Cette analyse par croisement d'informations, si elle peut s'effectuer visuellement (à l'identique de calques superposés les uns aux autres) nécessite souvent le croisement avec des informations alphanumériques. Croiser la nature d'un sol, sa déclivité, la végétation présente avec les propriétaires et les taxes payées est un exemple d'analyse sophistiquée que permet l'usage d'un SIG.

II.6.6. Croisement des couches d'informations par l'outil "Superposition pondérée" d'ARCGIS

L'analyse de superposition consiste en un ensemble de méthodologies appliquées à la sélection d'un site optimal ou à la modélisation d'aptitude. Il s'agit d'une technique permettant d'appliquer une échelle commune de valeurs à des entrées diverses et différentes de façon à créer une analyse intégrée. L'analyse de superposition nécessite souvent l'analyse de nombreux facteurs différents (type de sol, pente, lithologie...) et de définir leurs importance.

Les étapes générales à suivre pour effectuer une analyse de superposition sont présentées comme suit :

1. Définir le problème.
2. Décomposer le problème en sous-modèles.
3. Identifier les couches significatives.
4. Reclassifier ou transformer les données au sein d'une couche.
5. Pondérer les couches en entrée.
6. Ajouter ou combiner les couches.
7. Sélectionner les meilleurs emplacements.
8. Analyser.

II.7. Logiciels SIG

Il existe sur le marché plusieurs logiciels SIG, à savoir:

MapInfo est un SIG généraliste bureautique typique. Il permet de sortir très facilement toutes sortes d'analyses thématiques. Il autorise l'utilisateur à ouvrir des fichiers EXCEL, à ouvrir et à modifier des fichiers ACCESS, à travailler sur des données ORACLE... de manière transparente. En revanche, ses possibilités de modélisation sont pauvres. Il ne prévoit pas de travailler sur des données en client serveur, et le travail sur de grosses bases de données est difficile.

ArcView est également un SIG généraliste bureautique, même si l'intégration de données externe est plus délicate, il est convivial mais ses possibilités de structurations sont restreintes et il nécessite des compléments pour partager une base de données.

GéoConcept C'est un logiciel à la frontière entre SIG bureautique et SIG de gestion. Il offre l'ouverture et la convivialité des premiers, et il peut comme les seconds travailler en client serveur sur des Bases de Données de bonnes dimensions.

ArcInfo Sa dernière version : la V8 semble le mettre également entre les 2 premières catégories.

II.8. Logiciel ArcGIS

Le logiciel SIG utilisé dans cette étude est le logiciel ArcGis. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation. ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau.

En 1981, ESRI lança son premier logiciel SIG commercial appelé ArcInfo, qui combinait l'affichage d'entités géographiques points, lignes ou polygones avec des outils de gestion de base de données pour associer des attributs à ces entités. Le modèle de données géographiques utilisé alors était appelé "modèle géorelationnel", il a été utilisé jusqu'à la version 7 d'Arc/Info. En 2000, ESRI a lancé la version 8 d'ArcInfo, qui introduit de nouvelles

applications bureautiques pour Windows, ainsi qu'un nouveau modèle de données, la "géodatabase" (tout en maintenant l'ancien modèle géorelationnel).

Aujourd'hui la gamme ESRI s'appelle ARCGIS, et peut se décomposer en trois parties : ARCVIEW, ARCEDITOR et ARCINFO (figure II.3).

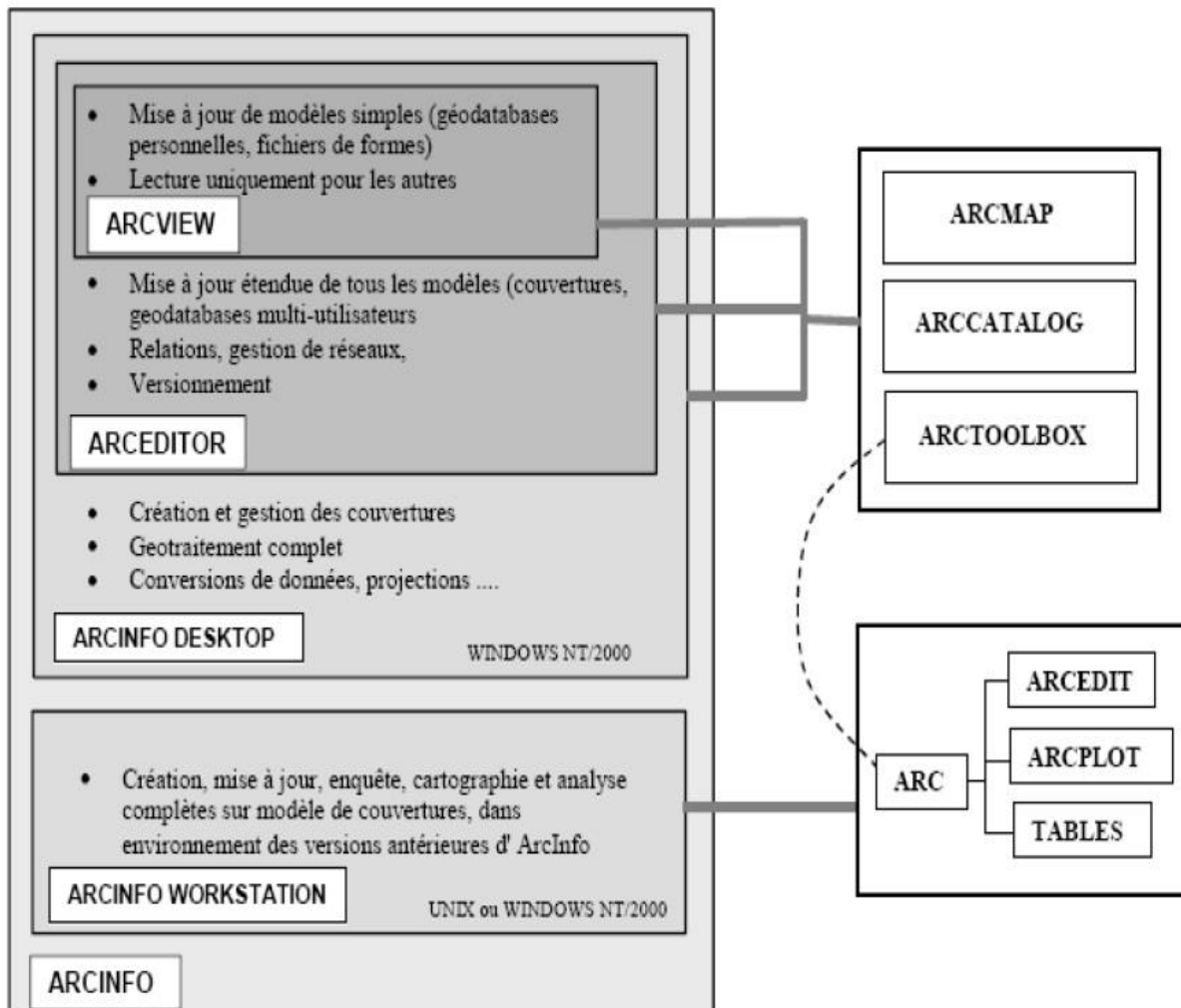


Figure II.2. Présentation du logiciel ARC/INFO

Chacune des 3 "versions" ArcView, ArcEditor et ArcInfo fonctionne dans l'environnement "Desktop", c'est à dire avec les trois applications : ArcCatalog, ArcMap et ArcToolBox.

CHAPITRE III :
MISE EN OEUVRE
ET APPLICATION

III.1. Introduction

Dans le domaine de l'exploitation des eaux souterraines, plusieurs études sont faites pour l'estimation de la recharge des aquifères qui représente un paramètre très important pour une gestion optimale des ressources en eau. Cependant, ce paramètre reste toujours difficile à estimer d'une façon précise.

Le présent chapitre présente l'une des méthodes de calcul de la quantité d'eau infiltrée (recharge) dans un aquifère. A l'aide d'un outil SIG nous allons dresser une carte synthèse de recharge présentant les différentes zones de recharge en fonction de leur degré d'infiltration.

Cette application est effectuée sur le plateau de Mostaganem dans la wilaya de Mostaganem.

III.2. Zone d'étude

III.2.1. Localisation du plateau de Mostaganem

Le plateau de Mostaganem est situé sur la côte du Nord-Ouest de l'Algérie, à environ 70 km à l'Est d'Oran, présent en rive gauche de l'oued Cheliff, un des plus grands oueds d'Algérie. Sa superficie est de 682 km². (Figure III.1)

Ce plateau est limité au Nord par l'Oued Cheliff, au Sud par la plaine des Bordjias et le massif de Beni Chougrane, à l'Est par le synclinal de Bouguirat et à l'Ouest par la mer méditerranée. L'altitude du plateau est comprise entre 110 m (à l'Ouest) et 470 m (à l'Est). L'altitude moyenne est de l'ordre de 200 m. Le plateau est en fait affecté par de nombreuses ondulations orientées NE-SW. A l'Est on note même de véritables collines toujours orientées NE-SW (Akboube, Ennaro, djebel Djezzar, Koubia Bsibissa).

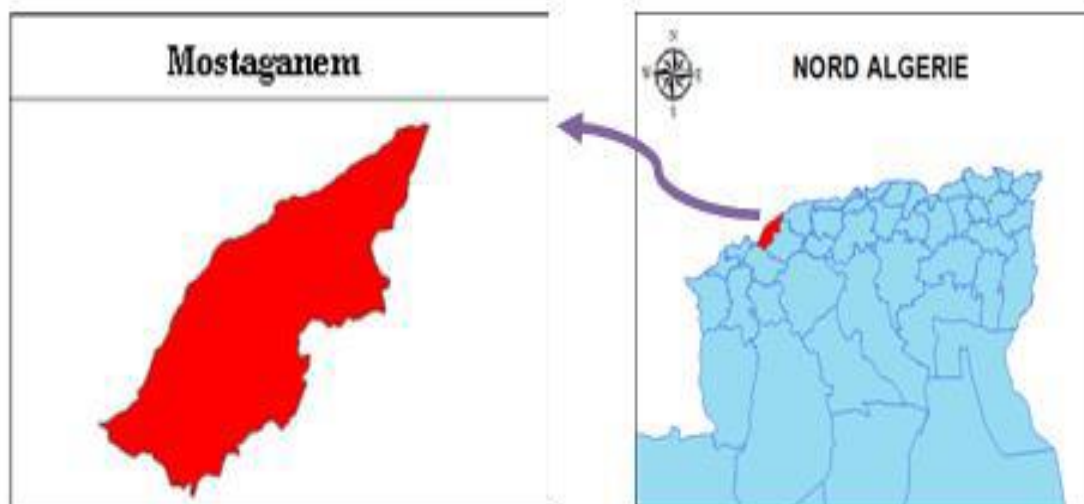


Figure III.1. Localisation du plateau de Mostaganem

III.2.2. Morphologie du plateau de Mostaganem

Sur le plan morphologique ; ce plateau est composé de deux secteurs :

- Une frange littorale.
- Le plateau proprement dit.

III.2.2.1. Frange littorale

Les dunes littorales et les formations grésifères du quaternaire dessinent un arc dont nous pouvons penser qu'il est la résultante de l'action des vents dominants et de la houle sur les structures régionales.

III.2.2.2. Plateau

Sur la partie occidentale, des faibles ondulations séparées par des vallées en forme de fuseaux sont distinguées.

- Vallée des Jardins au Centre.
- Dépression de Tounin Sayada au Nord.
- Vallée de Hassi Mamèche (Rivoli) au Sud.

Vers Tounin et Blad Touahria ; les sables prennent de plus en plus d'importance donnant deux grandes crêtes alternantes avec des dépressions parfois marécageuses (Belhadri, Merzouka, d'Ennaro). Au-delà crête de sidi Abdellah, nous entrons dans les montagnes boisées, des forêts d'Ennaro, de l'akboube et de Bel Hael. Les reliefs s'accroissent vers l'Est (vallée de la soif).

Le plateau se caractérise par le réseau hydrographique organisé limité seulement à deux petits Oueds :

- **Oued Séfra** : qui prend naissance dans la région des sept puits dont la longueur de 7km; malheureusement, il sert de collecteur d'égouts de la ville de Mostaganem.
- **Oued El Kheire** : affluent de Chélif, il est alimenté par Ain El Soutane.

III.2.3. Hydroclimatologie

Le plateau se caractérise par un régime climatique de type méditerranéen, doux et humide en hiver, sec et chaud en été. La pluviométrie annuelle est fortement irrégulière.

L'indice de Martonne $I=11.2$ témoigne d'un climat semi-aride. L'indice sur le niveau de l'évaporation est tangible. En cela, l'évaporation est bien sur très importante en été (169.4 mm en juillet) qu'en hiver (59.6 mm en février) (Baroudi, 2010).

III.2.4. Lithostratigraphie et structure

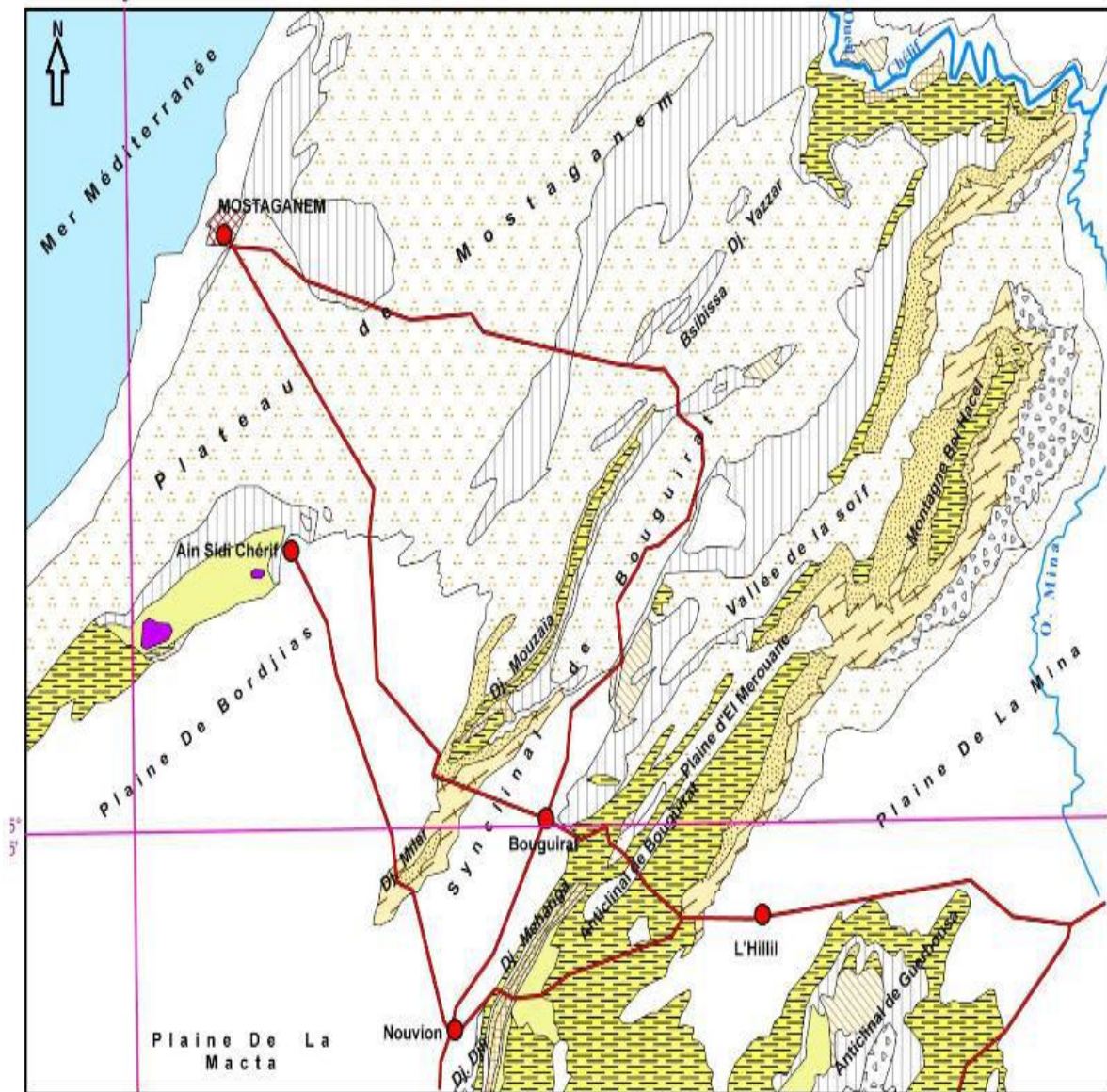
Le plateau de Mostaganem comporte dans son ensemble, une série imperméable constituée de marnes du Miocène ou des Pliocène inférieur qui forment le mur de l'aquifère. Ces marnes sont surmontées par des formations gréseuses ou gréso-sableuses avec quelques passées argileuses du pliocène supérieur et de quaternaire.

III.2.4.1. Lithostratigraphie

On distingue un ensemble de formations liées à deux grands cycles sédimentaire : Miocène et le Pliocène (Pirrodon, 1957). Ces deux cycles viennent s'installer sur un substratum formé essentiellement de grès et d'argiles du Numidien, de flysch vert du crétacé inférieur et de marne, marno-calcaires et de gypse du Trias. Le Quaternaire, constitué de terrains plus ou moins perméables, repose en discordance sur les formations précédentes (Gauchez, 1981). Il est constitué de micro-poudingues et de grès grossiers, attribués au Calabrien. Ce dernier est recouvert par des dépôts de grès à Hélix, de dunes consolidées, et de sols rouges (Figure III.2).

III.2.4.2. Structure

L'appellation de « plateau » attribuée à la région de Mostaganem par les géographes cadre bien avec la complexité réelle de ce secteur où dunes et formations récentes constituent un système en milieu légèrement plissée qui s'appuie sur sa périphérie sur des formations plus anciennes s'échelonnant du Pliocène au trias (Gauchez, 1981).



Légende:

Quaternaire

- Alluvions
- Sables
- Croûte
- Série continentale rouge (Villafranchien)
- Grès calcaire (calabrien)

Pliocène

- Grès continentaux à Hillix
- Grès marine (Astien)
- Marnes bleues (paléosanclen)

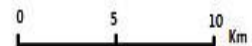
Miocène sup

- Gypses et marnes gypseuses
- Tripolis et marnes à Tripolis
- Marnes bleues

Trias

- Trias gypseux

Echelle: 1/200000



- ville

Figure III.2. Carte géologique du plateau de Mostaganem (Gauchez 1981)

III.2.5. Hydrogéologie

Dans son ensemble, la région de Mostaganem comporte un substratum marneux imperméable, surmonté de grès sableux ou argileux sableux qui contiennent l'aquifère principale et on trouve aussi les sables qui recouvrent les formations précédentes appelées « les sables du plateau de Mostaganem ». Parfois, nous trouvons une croûte calcaréo-gréseuse, associée à un sol rouge (Ouréah) (Tiab, 1999) (voir Figure III-3)

L'épaisseur des formations aquifère varie d'un endroit à un autre et diminue (100 à 120 m : Calabrien) en allant de l'Est-Nord-Est vers l'Ouest-Sud-Ouest.

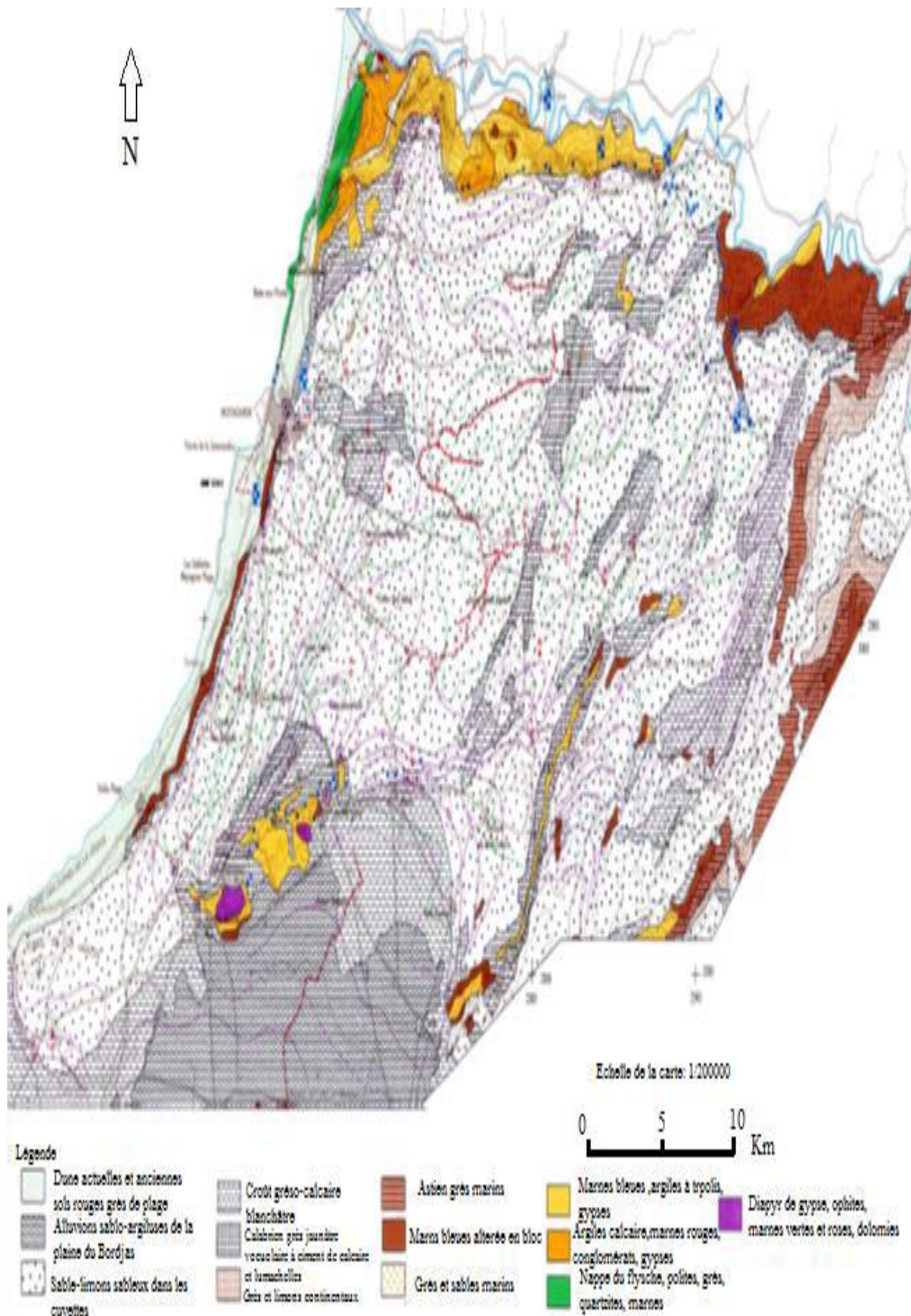


Figure III.3. Carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem (DEMHR 1974)

III.3. Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée dans cette étude consiste en deux principales étapes. La première étape consiste à déterminer et à étudier les différents paramètres qui influencent la recharge des aquifères. La deuxième étape consiste à croiser les informations spatiales relatives aux différents facteurs régissant la recharge des aquifères, pour obtenir la carte synthèse de la recharge de la zone d'étude.

Chacun des paramètres déterminés est étudié séparément et relativement apprécié par rapport aux autres paramètres. Une classification et une pondération sont ainsi définies pour chacun d'eux. Une cote (allant de 1 à 10) sera affectée à chaque classe. Par la suite, le rôle de chacun de ces paramètres dans l'infiltration est pondéré, évalué et exprimé sous le terme d'«indice d'infiltration» ainsi que son taux de contribution. Une carte thématique est alors établie pour chaque paramètre.

Enfin, l'implémentation sur un SIG (superposition des cartes thématiques des paramètres) permettra d'établir une carte synthèse sur laquelle seront circonscrites les zones de recharge potentielle de la zone d'étude.

III.3.1. Etude des facteurs régissant la recharge

Plusieurs paramètres régissent le calcul de la recharge des aquifères, les plus utilisés dans la littérature (Kouadio et al, 2008 ; Musy et Soutter, 1991) sont les paramètres suivants: la lithologie, la nature du sol, le couvert végétal, la nature du relief (pente), le réseau hydrographique caractérisant la zone d'étude (densité de drainage).

Le schéma suivant résume les principaux facteurs régissant l'infiltration :

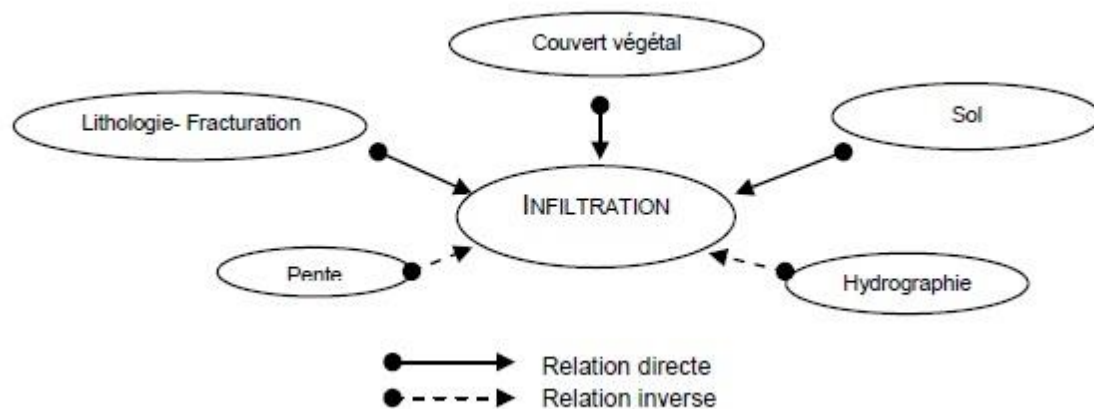


Figure III.4. Principaux facteurs régissant l'infiltration

A. Lithologie

Le caractère lithologique des roches exposées aux précipitations et des terrains superficiels est déterminant car il gouverne le processus d'infiltration et celui de l'évaporation, donc celui de la recharge des aquifères. En effet, le cheminement des eaux de la surface vers les profondeurs découle de la porosité, de la perméabilité, de la compaction et de la nature du ciment entre les grains des roches en surface, donc de la connaissance du caractère lithologique (Kouadio et al, 2008) de la zone d'étude. La figure III.5 représente les différentes classes de lithologies rencontrées dans la zone d'étude.

Une classification des différentes lithologies a été faite selon leurs perméabilités (MUSGRAVE.G.W, 1955). Le tableau III.1 regroupe en 04 classes les différentes lithologies selon leurs perméabilités :

Classes	Lithologie	Perméabilité
Faible	Métamorphique-altéré-grés	Très peu perméable
moyenne	Grés massif	Peu perméable
Forte à moyenne	Calcaire massif-sable et gravier	Perméable
Forte	Basalte et calcaire karstique	Très perméable

Tableau III.1. Différentes classes de lithologie

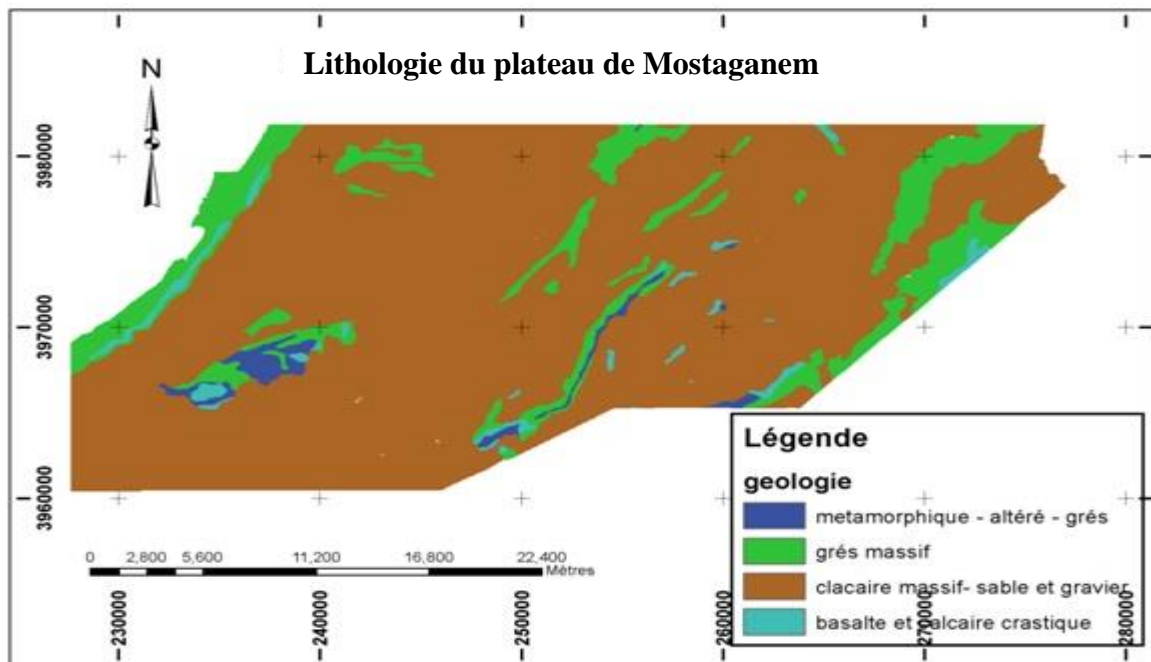


Figure III.5. Lithologie du plateau de Mostaganem.

B. Type de sol

Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes régissent en partie l'infiltration. De plus, la compaction de la surface du sol due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques) peut avoir pour conséquence la dégradation de la structure de la couche de surface du sol et la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur.

La figure III.6 représente les types de sol spécifique à la zone d'étude.

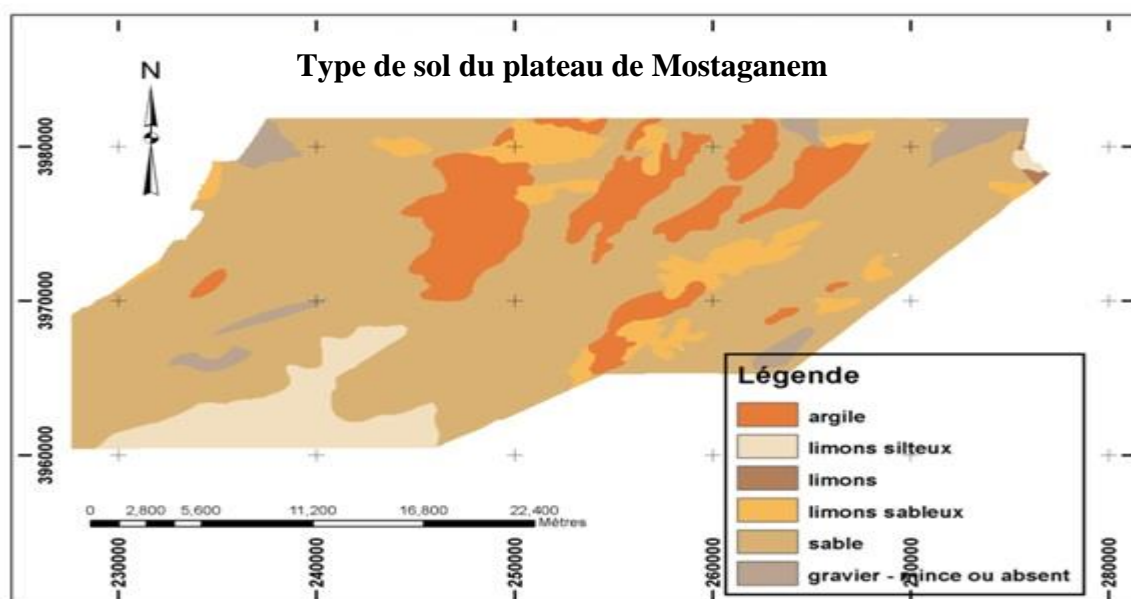


Figure III.6.Type de sol du plateau de Mostaganem.

Tableau III.2. Classification des types de sol de la zone d'étude.

classes	Sous classes	Superficie (km ²)	%
Forte à moyenne	Gravier	26	3.38
Moyenne	Sable	528	69.02
	Limons sableux	53	6.89
Faible	Limons	1	0.13
	Limons silteux	55	7.15
Très faible	Argile	102	13.41

Quatre (04) grandes classes ont été établies pour notre zone d'étude comme le montre le tableau III.2.

C. Pente

Une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration. L'analyse des expériences, faite par quelques chercheurs au cours des dernières années (Hamdi.Y, 2001), nous permet de retenir les remarques suivantes :

- Le taux d'infiltration diminue si la pente de la surface du sol augmente.
- Le taux d'infiltration augmente si la rugosité de la surface du sol augmente.

La figure III.7 montre les (04) classes de pente (α) qui caractérisent la zone d'étude :

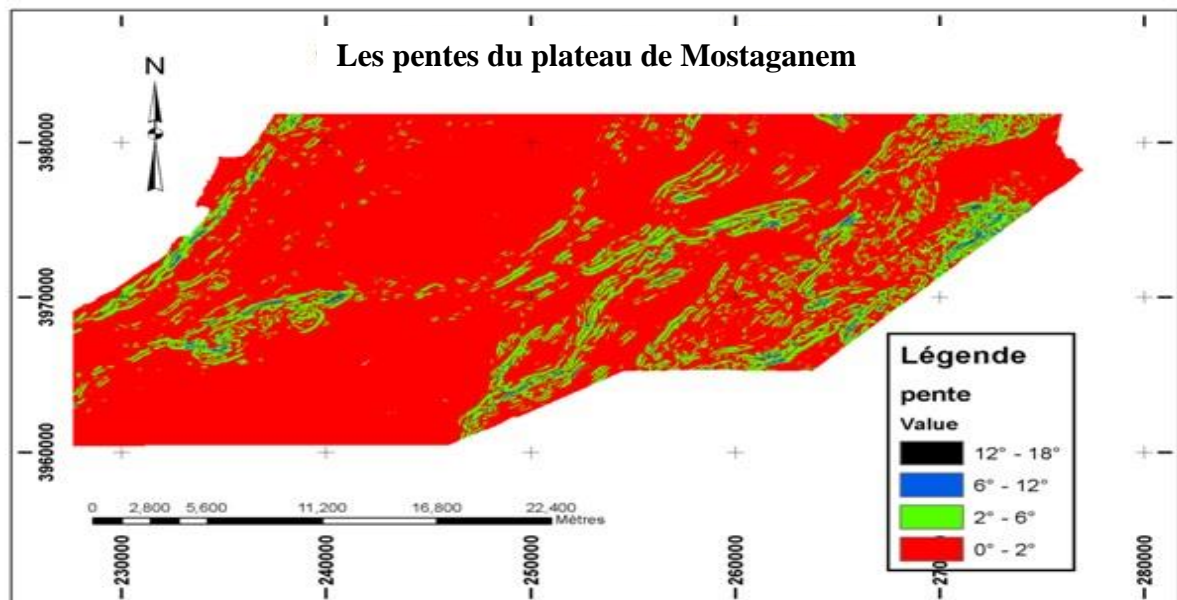


Figure III.7. Les pentes du plateau de Mostaganem.

Tableau III.3. Classes de pente.

Valeur de la pente (α)	Classes
$0 < \alpha < 2$	faible
$2 < \alpha < 6$	moyenne
$6 < \alpha < 12$	forte
$12 < \alpha < 18$	très forte

D. Réseau hydrographique

La forme ainsi que la densité du réseau hydrographique permettent de tirer des conclusions importantes quant au ruissellement et à l'infiltration des eaux.

La densité de drainage (Id) des cours d'eau est calculée à partir de la carte topographique relative à la zone d'étude.

Densité de drainage = longueur du cours d'eau / surface du bassin versant

Le calcul de la densité de drainage de la zone d'étude à révéler une densité $Id < 1$. Cette valeur concerne les plaines et les dépressions qui sont caractérisées par un écoulement très faible et parfois nul. Ainsi, une seule classe est déterminée pour la zone d'étude, c'est la classe faible et donc la plus favorable à l'infiltration.

Tableau III.4. Classes de densité de drainage

Densité de drainage (Id)	classe
Id < 1	Faible

E. Couvert végétal et l'occupation du sol (cv & os)

Le couvert végétal et l'occupation du sol jouent un rôle important dans l'évaluation de la recharge d'un aquifère. la couverture végétale freine le ruissellement et favorise l'infiltration.

Remarque:

Malheureusement et vue la non disponibilité du paramètre "couvert végétale" pour la zone d'étude, ce dernier n'a pas pu être pris en compte dans cette application.

III.3.2. Evaluation des cotes des paramètres

Afin d'estimer les cotes (notations) des différents paramètres de façon homogène, une échelle des cotes a été élaborée sur la base des plages de variation des paramètres. Nous obtenons ainsi l'échelle suivante :

Tableau III.5. Echelle des cotes

Classe	Très forte	forte	Forte à moyenne	moyenne	Moyenne à faible	faible	Très faible
Cote	10	8	6.5	5	3.5	2	1

Pour cette étude une cote à été attribué à toutes les classes appartenant à tous les paramètres selon le tableau **III.5** Les résultats de cette cotation sont illustrés dans le tableau **III.6**.

Tableau III.6. Valeurs des cotes pour tous les paramètres.

paramètre	Description	Cote de l'effet
Lithologie	Forte	8
	Moyenne à forte	5
	Moyenne	3.5
	Faible	2
Sol	Forte à moyenne	6.5
	Moyenne	5
	Faible	2
	Très faible	1
Pente	Très forte	1
	Forte	2
	Moyenne	3.5
	Faible	5
Réseau hydrographique	Faible	5

III.3.3. Pondération des paramètres de la recharge

La détermination des poids, des paramètres régissant la recharge, repose sur l'analyse des effets relationnels inter-paramètres, comme le montre la figure **III.8**.

Un point (1pt) est attribué pour chaque effet majeur, et un demi-point (0.5 pt) pour chaque effet mineur. Le poids de chaque facteur sera alors égal à la somme des effets qu'il exerce sur les autres (Shaban et al, 2001).

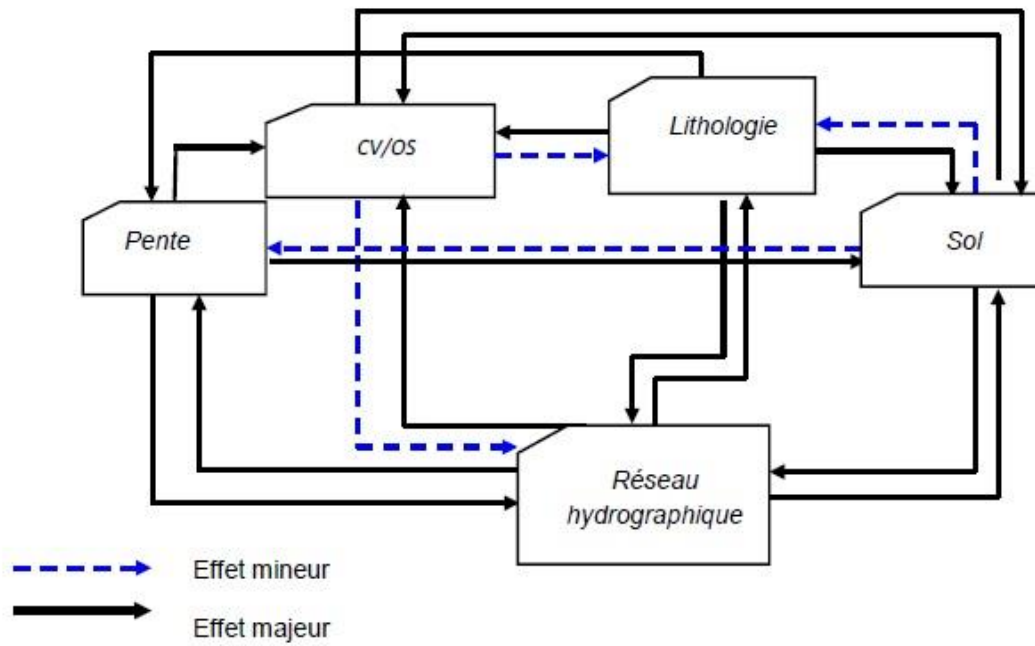


Figure III.8. Effets entre les paramètres.

En conséquence, le poids de chacun des facteurs est exprimé comme suit :

- Réseau hydrographique : 4 majeurs = $(4 \times 1) = 4$ pts
- Couvert végétal : 1 majeur + 2mineurs = $(1 \times 1) + (2 \times 0.5) = 2$ pts
- Penté : 3 majeurs = $3 \times 1 = 3$ pts
- Lithologie : 4 majeurs = $(4 \times 1) = 4$ pts
- Sol : 2 majeurs + 2 mineurs = $(2 \times 1) + (2 \times 0.5) = 3$ pts.

III.3.4. Détermination des indices d'infiltration et des taux de contribution

Pour évaluer la contribution de chaque paramètre dans la recharge potentielle, son poids et sa côte ont été intégrés tels que mentionné dans le tableau **III.7**.

Tableau III.7. Indices d'infiltration et les taux de contribution

Facteur	Description	cote	poids	(Poids) x (côtes)	Indice d'infiltration	Taux de contribution
Lithologie	Forte	8	4	32	86	29%
	Forte à moyenne	6.5		26		
	Moyenne	5		20		
	Faible	2		8		
Sol	Forte à moyenne	6.5	3	19.5	39	21%
	Moyenne	3.5		10.5		
	Faible	2		6		
	Très faible	1		3		
Pente	Très forte	1	3	3	34.5	21%
	Forte	2		6		
	Moyenne	3.5		10.5		
	Faible	5		15		
Réseau hydrographique	Faible	5	4	20	20	29%
					179.5	

III.4. Carte synthèse de recharge de la nappe du plateau de Mostaganem

L'établissement de la carte de recharge potentielle a été rendu possible grâce à *l'agrégation* de l'ensemble des cartes paramétriques élaborées et stockées sous forme de couches dessin (layer) dans le logiciel SIG utilisé.

III.4.1. Classes d'infiltration

La superposition pondérée des couches de dessin des quatre paramètres précédents révèle quatre (04) zones majeures d'infiltration. Ainsi, quatre (04) niveaux descriptifs ont été mis en évidence. La projection de ces niveaux sur l'échelle proposée par la FAO (1967), montre des classes d'infiltration à valeurs similaires qui vont de très faible à forte infiltration, regroupées dans le tableau **III.8.**

Tableau III.8. Classes d'infiltration du plateau de Mostaganem

Classe de recharge	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	Forte
Taux déterminé	5-10%	10-20%	20-30%	30-35%
Taux moyen	7.5%	15%	25%	32.5%
Taux FAO (1967)	5-10%	10-20%	-----	30-35%

La carte de recharge réelle basée uniquement sur le taux d'infiltration calculé par la superposition pondérée (dans l'étape précédente) est présentée sur la figure III.9.

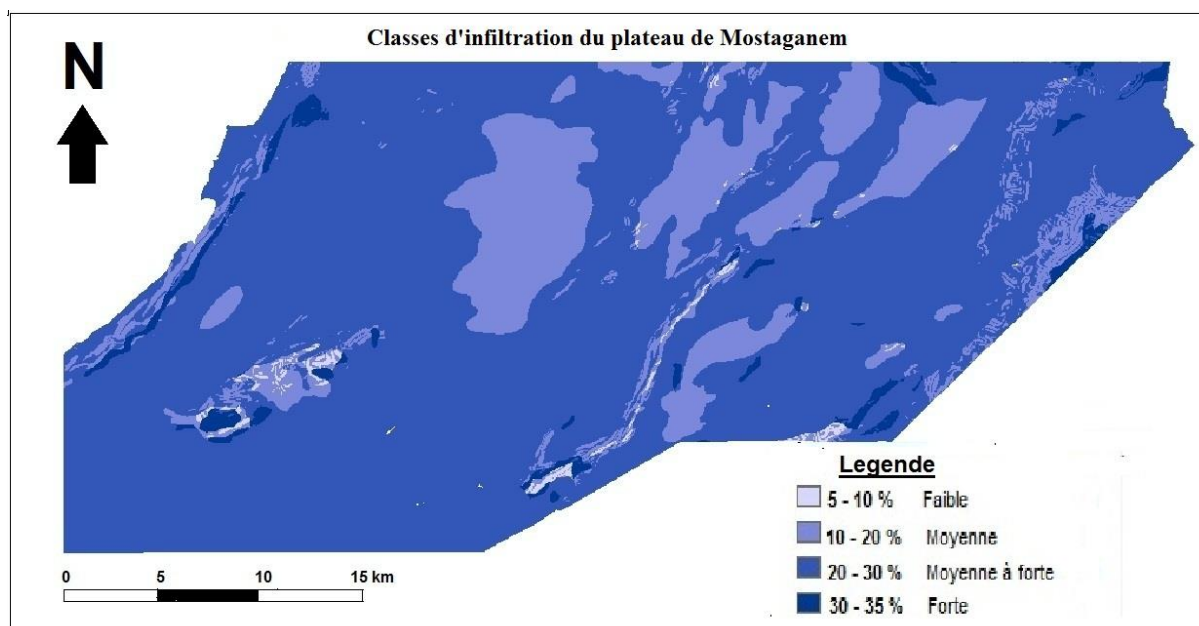


Figure III.9. Carte des classes d'infiltration du plateau de Mostaganem

III .4.2. Volume précipité

Le calcul du volume précipiter dans un bassin hydrographique se fait comme suit:

Volume précipité = précipitation moyenne x surface totale

D'après le tableau III.9 présentant les stations pluviométriques du secteur de Mostaganem, la précipitation moyenne ainsi que le volume précipité moyen ont été calculé comme suit:

- Précipitation moyenne = 394 mm (1988-2005).
- Volume précipité = $3 \times 10^8 \text{m}^3/\text{an}$ (sachant que la surface totale du plateau de Mostaganem est égale à $7.66 \times 10^8 \text{m}^2$).

Tableau III.9. Stations pluviométriques du secteur de Mostaganem

Stations	Xlambert (m)	Ylambert (m)	Periode	Pluviométrie annuelle Moyenne (mm/an)
Relizane	304,540.00	275,430.00	1988-2005	255.18
Bel Hacel	298,600.00	281,720.00	1989-2008	275.96
Mostaganem	266,400.00	293,400.00	1988-2005	394.14
O.El Kheir	291,550.00	297,600.00	1969 - 2004	283.11
B TOUAHRIA	277,000.00	284,600.00	1967 - 2004	303.2
FORNAKA	250,600.00	278,400.00	1970 - 2004	264.1
MARAISSIRAT	271,800.00	275,300.00	1970 - 2004	279.9
FMEASSORAIN	292,700.00	281,000.00	1969 - 2004	321.4
KHEIREDDINE	271,700.00	300,800.00	1969 - 2004	355.3
DCULTIVEES	274,000.00	288,300.00	1969 - 2004	318.4

III.4.3. Volume infiltré

La question à laquelle on devrait répondre à ce stade de l'application est : comment peut-on calculer la quantité globale et zonale de la recharge ?

Pour calculer la quantité d'eau réellement infiltrée, un calcul simplifié est proposé par la FAO (1967) :

Volume infiltré (V_{inf}) = volume précipité x Σ taux de recharge x % de la surface

La surface totale de la zone d'étude (Plateau de Mostaganem) est de **766,62Km²**. La surface de chaque zone d'infiltration dégagée par le logiciel SIG est déterminée comme suit:

- Zone 1 représente 0,3% de la surface totale (**sa surface est de 2.25 Km²**).
- Zone 2 représente 25,7 % de la surface totale (**sa surface est de 197 Km²**).
- Zone 3 représente 71,6% de la surface totale (**sa surface est de 549,20 Km²**).

- Zone 4 représente 2,4 % de la surface totale (**sa surface est de 18,17 Km²**).

Donc, le volume infiltré est calculé par la formule suivante:

$$V_{\text{inf}} = 3 \times 10^8 (0.003 \times 0.075 + 0.257 \times 0.15 + 0.716 \times 0.25 + 0.024 \times 0.325)$$

$$V_{\text{inf}} = 6.77 \times 10^7 \text{m}^3/\text{an}$$

Ceci veut dire que **22.56 %** des précipitations s'infiltrent. La lame infiltrée serait alors **L_{inf} = 89 mm/an**. Cette infiltration se répartit sur la zone d'étude comme suit :

0.07 % des précipitations s'infiltrent dans la zone 1 et donc **L_{inf}** est égale à **0.27mm/an**.

5.80 % des précipitations s'infiltrent dans la zone 2 et donc **L_{inf}** est égale à **22.85mm/an**.

16.15 % des précipitations s'infiltrent dans la zone 3 et donc **L_{inf}** est égale à **63.63mm/an**.

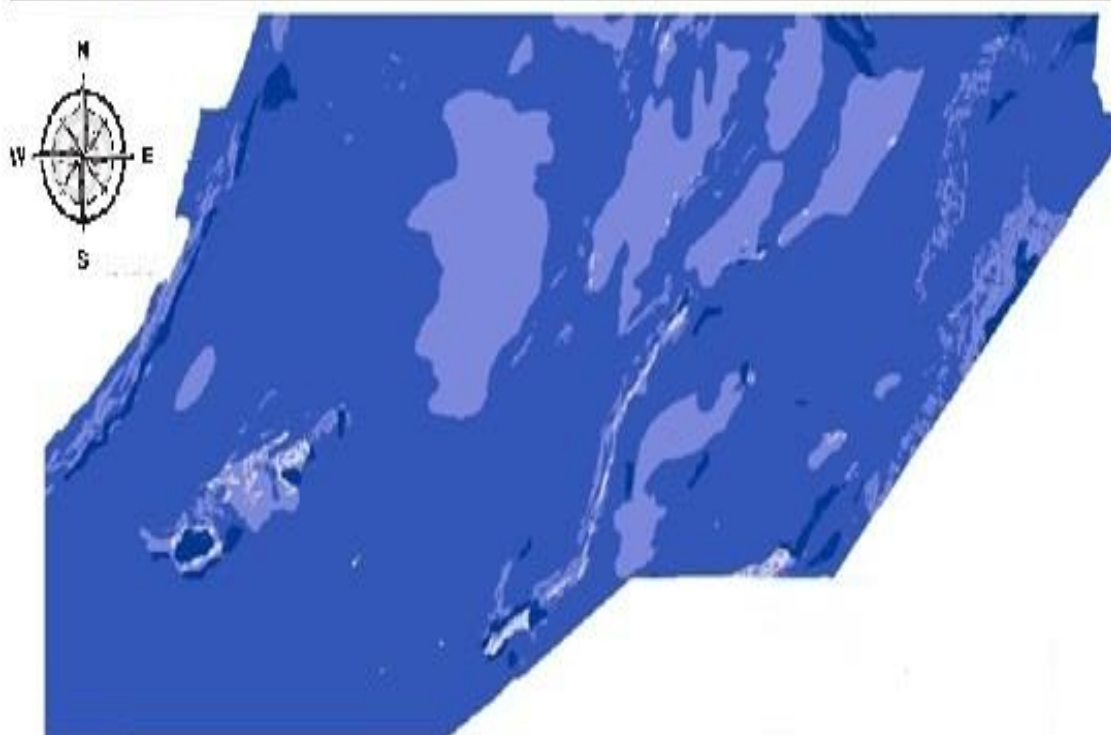
0.54 % des précipitations s'infiltrent dans la zone 4 et donc **L_{inf}** est égale à **2.13mm/an**.

Donc, quatre (04) zone de recharge, relatives aux classes d'infiltration, se sont dégagées pour la zone d'étude (voir la figure **III.10**), à savoir:

- Zone 1 où la recharge est faible puisque ce sont des régions montagneuses présentant une forte pente et des terrains presque imperméables. La lame infiltrée dans cette zone est égale à **0.27mm/an**.
- Zone 2 où la recharge est moyenne à cause de la diminution de la pente et la perméabilité des formations géologiques dans cette zone. La lame infiltrée dans cette zone est égale à **22.85mm/an**.
- Zone 3 et 4 où la recharge varie de moyenne à forte et parfois très importantes. Ceci est due à la nature lithologique de cette zone, à la densité de drainage et à la pente qui caractérise cette zone (une plaine avec plusieurs bassins versants), ceux qui favorisent l'infiltration. La lame infiltrée dans cette zone est égale à **65.76mm/an**.

Carte de recharge potentielle du plateau de Mostaganem

Classes de recharge	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	Forte
Surface (Km ²)	2.25	197	549,20	18,17
Volume infiltré (m ³ /an x 10 ⁸)	0.0021	0.17	0.48	0.016
Lame infiltré (mm/an)	0.27	22.85	63.63	2.13



0 5 10 15 km

Legende

- 1 Faible (5-10%)
- 2 Moyenne (10-20%)
- 3 Moyenne à forte (20-30%)
- 4 Forte (30-35%)

Zone 1 : la recharge est faible puisque ce sont des régions montagneuses présente une forte pente et des terrains presque imperméables.

Zone 2 : la recharge est peu importante à cause de la diminution de la pente et la perméabilité des formations géologiques dans cette zone.

Zones 3 et 4 : la recharge est forte et parfois très importantes grâce au plusieurs causes ; la nature lithologique, la densité de drainage et la pente (une plaine avec plusieurs bassins versants) ceux qui favorisent l'infiltration.

Figure III.10. Carte synthèse de la recharge en eaux souterraines du plateau de Mostaganem

III.5. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la recharge en eaux souterraines, au niveau de la nappede plateau de Mostaganem, est moyenne (elle est de **22.56%** avec une lame infiltrée de **$L_{inf} = 89\text{mm/an}$**).

Les deux paramètres, qui régissent la recharge réelle en eaux souterraines à savoir: pente et réseau hydrographique de cette région, sont les plus favorables pour l'infiltration des eaux de précipitation; car la région représente des plaines et des dépressions avec une densité de drainage faible. La lithologie et le type du sol, quant à eux, contrôle la diminution ou l'absence de l'infiltration dans certaines zones (argile, limons...).

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'évaluation de la recharge réelle des nappes d'eaux souterraines est l'un des paramètres les plus importants et le plus difficile à estimer. Une bonne évaluation, de ce paramètre, entraîne automatiquement une bonne gestion et une exploitation rationnelle des ressources naturelles en eaux souterraines.

La réalisation de la carte synthèse, de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem dans cette étude, a été possible en agrégeant les différentes cartes spatialisées relatives aux paramètres régissant l'infiltration des eaux souterraines. En utilisant l'outil de l'analyse spatiale, disponible dans le logiciel ArcGis, l'agrégation et la compilation des données géographiques spatialisées (lithologie, pente, type de sol, réseau hydrographique) ont été possibles.

La carte synthèse, de la recharge de la nappe du plateau de Mostaganem réalisée dans cette étude, a permis de dégager quatre zones de recharge, qui divise la zone d'étude en quatre unités différentes. La première zone où la recharge est faible puisque ce sont des régions montagneuses présentant une forte pente et des terrains presque imperméables. La deuxième zone où la recharge est peu importante à cause de la diminution de la pente et la perméabilité des formations géologiques de cette zone. La troisième et quatrième zone où la recharge est forte et parfois très importantes. Ainsi une recharge globale réelle de 89mm/an caractérise la nappe du plateau de Mostaganem.

Les résultats de cette étude montrent que le taux d'infiltration des eaux de précipitation vers la nappe du plateau de Mostaganem est moyen. Ce résultat est parfaitement logique par rapport aux propriétés hydrogéologiques et climatiques (la pluviométrie) du plateau de Mostaganem.

Toutefois, cette approche reste une proposition d'analyse spatiale qui devrait être confirmée par des mesures de terrain avant de pouvoir être utilisée dans le cadre de prise de décision. Une validation plus rigoureuse impliquerait la définition de nouveaux critères ou à en modifier les pondérations affectées. Des mesures en différents points et une quantification de l'effet des paramètres pourraient aussi être envisagées.

Bibliographie

Bibliographie

- Abdesselam K** (2011). La gestion de l'eau en Algérie : Un problème épineux - El Watan, 8 octobre 2011.
- Arjen v.d.W** (2008). Connaissances des méthodes de captage des eaux souterraines - appliquées aux forages manuels - Manuel d'instruction - avril 2008.
- BAROUDI Z.** (2010). Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Mostaganem. Mémoire d'ingénieur d'Etat en hydrogéologie, Science de la terre. Univ. Oran.
- Boussema, M.R.,** (1994). Base de données et cartographie numérique. Thèse de Doctorat d'Etat es- Sciences Géologiques, Sujet complémentaire. F.S.T., 64 p.
- Brodie, R. S. & Hostetler, S.** (2005). Examen des techniques d'analyse du flux de base à partir du flux Hydrogrammes. Proc. NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conf., Vol. 28.
- Chesnaux, R.** (2013). Évaluation régionale de la recharge dans l'aquifère cristallin du rocher du Kenogami -Uplands, Canada. Hydrol. Sci. J. 58 (2), 421-436.
- Department of the Environment (DoE)** (1987). Traitant de l'information géographique-HMSO, London
- Diane M** (2008). Captage d'eau souterraine pour des résidences isolées – Guide technique.
- Dupuit, A. J. E. J.** (1863). Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et a travers les terrains perméables: avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières a fond mobile. Paris : Dunod. 304 pages.
- Erhard Cassegrain, A. & Margat, J.** (1979). Introduction à l'économie générale de l'eau. BRGM, Orléans, France.
- Flint, A. L., Flint, L. E., Kwicklis, E. M., Fabryka-Martin, J. T. & Bodvarsson, G. S.** (2002). Estimation de la recharge chez Yucca Mountain, Nevada, États-Unis: comparaison des méthodes. Hydrogeol. J. 10(1), 180–204.

- GAUCHEZ J.** (1981). Etude hydrogéologique du plateau de Mostaganem (Algérie).
Thèse Doctorat 3ème cycle de géologie des ensembles sédimentaires. Tome 1. Univ.
Lyon 1, 125 p., 22 Tabl., 44 Fig.
- Ghayoumian J, Ghermezcheshme B, Feiznia S, Noroozi A.A.** (2005). Intégrer les SIG
et le DSS pour l'identification de zones appropriées pour la recharge artificielle,
l'étude de cas Le bassin de Meimeh, Isfahan, l'Iran - La géologie de l'environnement,
47 (4) (2005), pp. 493–500.
- Gogolev, M. I.** (2002). Évaluation de la recharge des eaux souterraines avec deux
technologies de modélisation de zones non saturées. Environ. Geol. 42(2-3), 248–
258.
- Hamdi, Y.** (2001). Contribution à la modélisation numérique du cycle de l'eau. PhD,
Université Laval, Québec, Canada.
- Kouadio E.K. & al.** (2008) : prospection d'hydrogéologie dans la zone cristalline et
métamorphique par analyse spatiale du potentiel de productivité. European Journal of
Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.22 No.3 (2008), pp.373-390.
- Krishnamuryy J., Venkatese Kumar N., Jayaraman V. Et Manivel M.** (1996). Une
approche pour délimiter les zones potentielles d'eaux souterraines par télédétection et
un système d'information géographique. Journal international de télédétection, vol. 7,
n ° 10, p. 1867-1884.
- Le centre d'information sur l'eau.** Les défis mondiaux d'aujourd'hui et de demain;
(2013) le jeudi 8 août 2013- source : Eurostat 2002.
- Le Centre d'information sur l'eau.** Les ressources en eau dans le Monde (2013).
- Margat J.** (1989). L'eau dans le bassin méditerranéen- prospective des besoins et des
ressources. (PNUE/PAM plan bleu, doc.BRGM, Orléans).
- Martine V.** (2015). La crise de l'eau illustrée en 5 graphiques – Le monde (20.03.2015).
- Misstear.** (2000). Évaluation de la recharge des eaux souterraines: un élément clé de la
gestion du bassin hydrographique January 2000.

- Modalités de captage des eaux souterraines à La Réunion.** Analyse critique de l'existant (techniques, coûts, opérateurs) - BRGM/RP-56787-FR- Novembre (2008).
- Musgrave, G. W.** (1955). "Combien de pluie entre dans le sol?" Dans l'eau, l'Annuaire de l'agriculture 1955. 151-159. Superintendent of Documents, Washington DC.
- Musy A. ; Soutter, M.** (1991). Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335 p.
- Nappe d'eau souterraine** – Vikidia, 19 Décembre (2016).
- PIRRODON A.** (1957). Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Mém. Serv. Carte géol. Algérie. Nouvelle série, n°12, Alger, 343 p.
- RODHE A. et BOCKGARD N.** (2006). Recharge d'eau souterraine dans un aquifère dur: un modèle conceptuel comprenant des effets de chargement de surface. Journal d'hydrologie, vol. 330, n° 3-4, p. 389-401.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. & Cook, P. G.** (2002). Choisir des techniques appropriées pour quantifier la recharge des eaux souterraines. Hydrogeol. J. 10(1), 18–39.
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C.** (2006). Utilisation de la télédétection et des SIG pour déterminer la zone de potentiel de recharge: le cas de l'Occidental Liban. Hydrogeol J 14:433–443.
- Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, Strasbourg** (1989). QU'EST CE QU'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE?
- Sophocleous M.,** (2004). Rechargement des eaux souterraines et budgets de l'eau des hautes plaines du Kansas Et aquifères connexes. Bulletin Géologique du Kansas Bulletin 249. 102 p.
- Stephens, D. B.** (2009). Considérez également la recharge. Eau souterraine 47(1), 2–3.
- Quelques notions sur l'eau souterraine.** Syndicat mixte d'études et de gestion de la ressource en eau du département de la Gironde (SMEGREG) -

Vries, J. J. de & Simmers, I. (2002). Recharge des eaux souterraines: un aperçu des processus et des défis. *Hydrogeol. J.* 10(1), 5–17.

Yin, L., Hu, G., Huang, J., Wen, D., Dong, J., Wang, X. et Li, H. (2011). Recharge d'eau souterraine -Estimation dans le plateau d'Ordos, en Chine: comparaison de méthodes. *Hydrogeol. J.* 19 (8), 1563-1575.