



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent - Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Hydraulique

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbain

Thème :

Essai d'élaboration de la méthodologie de modélisation 3D des nappes aquifères

PRESENTE PAR :

BENYAGOUB ASMA

HAOUARI FODIL

SOUTENU LE : 24/06/2025

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENTE : D. BENTAHER

EXAMINATRICE : D. AIT AMR

ENCADREUR : D. HAKIM KADDOUR

ANNEE UNIVERSITAIRE 2025/2026

الإهداء

## DEDICACE

الحمد لله الذي علّم الإنسان ما لم يعلم، وسخّر له سُبُل المعرفة ومدّد له جسور الفهم، الحمد له على نعمة

العقل، وعلى كل لحظة سَخَّرَ فيها لي أسباب النجاح، ظاهرها وباطنها

إلى من كان حبّهم دعمي، وصبرهم وقودي، ودعاؤهم ظهري الذي لا ينكسر

أهدي هذا العمل إلى والديّ الحبيبين، نبض روحي وضياء دربي

إلى أمي، نبع الحنان، التي لا تكلّ ولا تملّ، والتي كانت سكينه قلبي في لحظات التعب، ونورها كان دليلي

في العتمة

وإلى أبي، سندي الأول، من غرس في قلبي أن الكفاح هو طريق العظماء، وأن الصبر مفتاح كل خير

إلى إخوتي وعائلتي، الذين كانوا دفعي في البرد، وسندي في العسر، ومصدر فرحي حين تشرق لحظات

النجاح

إلى أصدقائي الذين شاركوني الدرب بكل حبّ وصدق، الذين كانوا البلمس في أيام التعب، والضحكة

التي تسرق لحظات القلق... كنتم وطننا وإلى أولئك الذين أناروا درب العلم قبلنا، من أفنوا أعمارهم في

سبيل البحث والمعرفة، لهم كل التقدير والعرفان

هذا العمل ثمرة من غرسهم، وامتداد لحلمهم، بنوه بحجر الجهد وعرق السنين

# REMERCIEMENT

الحمد لله رب العالمين، حمدًا يليق بجلاله وعظيم عطائه، الذي ألهمنا القوة، وأحاطنا بعنايته،  
ويسّر لنا إنجاز هذا العمل وبلوغه هذه الصورة المرضية  
بالأمس كُنّا في بدايات الطريق، نحمل أحلامًا كبرى وعيوننا ترنو إلى يوم التخرّج كأنه حلم  
بعيد، وها نحن اليوم نقطف أولى ثمار هذا المشوار الطويل  
هذا البحث الذي أضعه بين أيديكم، لم يكن نتاج مجهود فردي فقط، بل هو حصيلة ساعات من  
الجِدِّ، والتفاني، والاستعانة بكل ما أتيج لي من مصادر ومعارف، ليخرج بهذه الصيغة العلمية  
المتكاملة

وإيمانًا مني بأن من لا يشكر الناس لا يشكر الله، أُعبّر عن خالص امتناني وتقديري للأستاذ  
الفاضل الدكتور قدور حكيم، الذي كان له الأثر البالغ في توجيهي خلال هذه المرحلة، بما قدّمه  
من دعم أكاديمي ونقد بناء وتعليمات سديدة أسهمت كثيرًا في إثراء هذا العمل وتطويره  
أتقدّم بخالص الشكر والامتنان إلى الأستاذة بن شكور حسبية التي رافقتنا خلال مشوارنا  
الدراسي بكل عزيمة وحضور فعّال، كما أشكر من أعماق قلبي الأستاذة مصطفىاوي على دعمها  
وتشجيعها المستمرين

ولا يفوتني أن أعبّر عن امتناني الكبير للسيد رئيس لجنة المناقشة والسيد المصحح، لتفضّلهما  
بقبول مناقشة هذه المذكرة، وتخصيص وقت ثمين لتقييمها وتصحيحها

كما أخصّ بالشكر والتقدير عائلتي العزيزة، كل فرد منها، على صبرهم، دعمهم، واحتوائهم لي  
في كل مراحل هذا المشوار  
وأتوجّه بكل المودة والامتنان لأصدقائي وكل من قدّم لي كلمة طيبة أو دعمًا ماديًا أو معنويًا فلكم  
جميعًا جزء من هذا الإنجاز

## ملخص

تعتبر المياه الجوفية مصدرا مهما في مجالات عدة لحياة الأفراد والمجتمعات، حيث أنها حاضنة مياه الأمطار مثلها مثل السدود، ويتم استغلالها عن طريق حفر الآبار

إلا أن هذا الأمر الأخير يتطلب ليس فقط معرفة دقيقة لمكان تواجدها تحت الأرض ولكن عمقها ونوعها وكميات المياه المخزونة فيها. مما يشكل تحديا كبيرا على المستوى التقني والعلمي

تعتبر هذه المذكرة مدخلا وصورة عامة لهذا المجال المهم بهذه وضع منهجية فعّالة لنمذجة ثلاثية الأبعاد للطبقات الجوفية المائية، باعتبارها أداة حديثة لفهم سلوك المياه الجوفية وتدبيرها المستدام

يتناول العمل في بدايته المفاهيم الأساسية المتعلقة بالطبقات الجوفية من حيث أنواعها وخصائصها الهيدروديناميكية، ثم يستعرض تقنيات جمع البيانات الطبوغرافية، الجيولوجية، المناخية والهيدرولوجية، مع التركيز على أهمية نظم المعلومات الجغرافية (SIG)

كما يناقش البحث أدوات النمذجة الرقمية مثل MODFLOW و GMS وتقنيات التصور ثلاثي الأبعاد، من خلال تحليل طرق الاستيفاء وتمثيل الطبقات والنماذج التفاعلية

ويخلص إلى اقتراح منهجية علمية متكاملة لتمثيل الطبقات الجوفية بدقة، بهدف دعم اتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية الجوفية.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة ثلاثية الأبعاد , الطبقات الجوفية المائية , البرمجيات الهيدرولوجية

## Résumé

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle dans plusieurs domaines liés à la vie des individus et des communautés. Elles jouent un rôle similaire à celui des barrages en stockant les eaux de pluie, et sont exploitées principalement par le forage de puits.

Cependant, cette exploitation nécessite non seulement une connaissance précise de leur localisation sous la surface terrestre, mais aussi de leur profondeur, de leur qualité et des volumes d'eau stockés. Cela représente un défi majeur tant sur le plan technique que scientifique.

Ce mémoire constitue une introduction et une vue d'ensemble sur ce domaine crucial, en proposant une méthodologie efficace pour la modélisation tridimensionnelle des aquifères souterrains. Cette approche est considérée comme un outil moderne permettant de mieux comprendre le comportement des eaux souterraines et d'en assurer une gestion durable.

Le travail commence par la présentation des concepts de base liés aux aquifères, notamment leurs types et leurs propriétés hydrodynamiques. Il aborde ensuite les techniques de collecte de données topographiques, géologiques, climatiques et hydrologiques, en mettant l'accent sur l'importance des systèmes d'information géographique (SIG).

La recherche explore également les outils de modélisation numérique tels que MODFLOW et GMS, ainsi que les techniques de visualisation 3D, à travers l'analyse des méthodes d'interpolation, la représentation des couches et le développement de modèles interactifs.

Enfin, une méthodologie scientifique intégrée est proposée pour représenter avec précision les couches aquifères, dans le but de soutenir la prise de décision en matière de gestion des ressources en eaux souterraine .

**Mots-clés :** Modélisation 3D , Nappes aquifères , Logiciels hydrogéologiques

## Abstract

Groundwater represents a vital resource in various fields essential to the lives of individuals and communities. Like dams, it acts as a natural reservoir for rainwater and is typically exploited through well drilling. However, this process requires not only accurate knowledge of the location of groundwater beneath the surface, but also its depth, quality, and storage capacity—posing significant technical and scientific challenges.

This thesis serves as an introduction and general overview of this important field, aiming to establish an effective methodology for three-dimensional modeling of aquifer systems. This modern tool provides deeper insight into groundwater behavior and supports its sustainable management.

The study begins by presenting the fundamental concepts related to aquifers, including their types and hydrodynamic properties. It then explores techniques for collecting topographic, geological, climatic, and hydrological data, with a focus on the role of Geographic Information Systems (GIS).

Furthermore, the research investigates digital modeling tools such as MODFLOW and GMS, as well as 3D visualization techniques, through the analysis of interpolation methods, layer representation, and interactive modeling.

Ultimately, the work proposes a comprehensive scientific methodology for accurately representing aquifer layers, with the objective of supporting decision-making in the management of groundwater resources.

**Keywords:** 3D Modeling – Aquifer Systems – Hydrogeological Software.

# ***LISTES DES ABRÉVIATIONS***

MNT : Modèle Numérique de Terrain

GPS : Système de Positionnement Global

MNE : Modèle Numérique d'Elévation

MNS : Modèle numérique de surface

SIG : Systèmes d'information géographique

MNA : Modèles Numériques d'Altitude

STRM : Shuttle Radar Topography Mission

l'IDW : Inverse Distance Weighting

l'USGS : United States Geological Survey

LPF : Layer Property Flow

RCH : Recharge

GMS : Ground water Modeling System

# SOMMAIRE

<b>DEDICACE</b> .....	<b>I</b>
<b>REMERCIEMENT</b> .....	<b>II</b>
ملخص .....	<b>III</b>
Résumé .....	<b>IV</b>
Abstract.....	<b>V</b>
<b><i>LISTES DES ABRÉVIATIONS</i></b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XVI</b>
<b>CHAPITRE 01 : CONCEPTS GÉNÉRAUX SUR LES NAPPES AQUIFÈRES</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction :.....	<b>4</b>
1.2 Définition des nappes aquifères : .....	<b>4</b>
1.3 Les Caractéristiques d`une nappe aquifère : .....	<b>5</b>
1.4 Typologie des aquifères : .....	<b>6</b>
1.5 Les propriétés hydrodynamiques : .....	<b>9</b>
▶ Définition d`un paramètre hydrodynamique : .....	<b>9</b>
1.5.1 La porosité : .....	<b>9</b>
1.5.2 La perméabilité : .....	<b>13</b>

1.5.3	Le coefficient de perméabilité (de Darcy) :	15
1.5.4	La transmissivité :	16
1.5.5	Le coefficient d'emménagement :	17
1.5.6	Le débit spécifique :	19
1.6	Importance des nappes dans la gestion des ressources en eau:	22
1.7	Problèmes liés à l'exploitation des nappes:	22
1.8	Solutions possibles :	23
1.9	Conclusion :	24
<b>CHAPITRE 02 : ÉTAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES DE COLLECTE DES DONNÉES</b>		<b>25</b>
2.1	Introduction :	26
2.2	Acquisition des données topographiques :	26
2.2.1	Modèle numérique du terrain :	26
	▶ Définition du MNT :	26
2.2.1.1	Les différents types du modèle numérique du terrain :	27
2.2.1.2	Importance et domaines d'applications du MNT :	28
2.2.1.3	Utilisation du MNT dans le domaine hydrologique :	29
2.2.2	Le Système de positionnement global :	30
2.2.2.1	Importance du GPS dans la collecte de données géospatiales pour les études hydrogéologiques :	31
2.2.2.2	Applications du GPS dans l'étude des nappes aquifères :	31

<b>2.3 . Méthodes de collecte des données géologiques et hydrogéologiques :</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1 Méthode destructive :</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1.1 Logs de forages :</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1.2 Importance des logs de forages :</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2 Méthode non destructive :</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2.1 Études géophysiques :</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2.2 Les domaines d'utilisation de l'étude géophysique :</b>	<b>35</b>
<b>2.4 Méthodes de mesure des niveaux piézométriques :</b>	<b>35</b>
<b>2.4.1 Méthodes manuelles :</b>	<b>36</b>
<b>Avantages et inconvénients :</b>	<b>37</b>
<b>2.4.2 Méthodes automatiques :</b>	<b>38</b>
<b>2.4.3 Méthodes indirectes :</b>	<b>39</b>
<b>2.4.4 Méthodes géophysiques (diagraphies, résistivité électrique) :</b>	<b>40</b>
<b>2.5 Collecte des données climatiques et hydrologiques :</b>	<b>40</b>
<b>2.5.1 Les données climatiques :</b>	<b>40</b>
<b>2.5.1.1 Types de données climatiques :</b>	<b>41</b>
<b>2.5.1.2 Sources de données climatiques :</b>	<b>41</b>
<b>2.5.1.3 Intégration des données climatiques dans la modélisation 3D :</b>	<b>42</b>
<b>2.5.2 Les données hydrologiques :</b>	<b>42</b>
<b>2.5.2.1 Sources de collecte des données hydrologique :</b>	<b>42</b>

<b>2.6 Apport des SIG pour les nappes aquifères :</b>	<b>43</b>
2.6.1. Captation et Stockage des Données :	44
2.6.2. Manipulation et Traitement des Données :	44
2.6.3. Analyse Spatiale :	44
2.6.4. Visualisation et Cartographie :	44
2.6.5. Gestion Intégrée des Données :	45
2.6.6. Les applications Pratiques :	45
<b>2.7 Limites et défis liés à la collecte des données :</b>	<b>46</b>
2.7.1. Accès aux données :	46
2.7.2. Variabilité temporelle :	46
2.7.3. Complexité des processus souterrains :	46
2.7.4. Qualité des données :	47
2.7.5. Interprétation et modélisation des données :	47
<b>2.8 Conclusion :</b>	<b>47</b>
 <b>CHAPITRE 03 : ÉTAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT ET DE VISUALISATION</b>	 <b>48</b>
3.1 .Introduction :	49
3.2 . Techniques de visualisation en 3D :	49
3.2.1 Maillages volumétrique :	49
3.2.2 ISO surface et surface équipotentiellles :	50

3.3.3 Visualisation du flux :	50
3.3.4 Coupes transversales :	50
<b>3.3 Interpolation des données :</b>	<b>50</b>
3.3.1 Les méthodes d'interpolation des données :	51
3.1.1.1 La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW) :	51
3.1.1.2. Le krigeage :	51
3.1.1.3 La méthode Spline :	51
3.1.1.4 La méthode linéaire :	52
<b>3.4. Représentation des couches géologique et piézométriques :</b>	<b>52</b>
3.4.1 Les étapes de la représentation :	52
<b>3.5 . Outils logiciels pour la modélisation des nappes aquifères :</b>	<b>54</b>
3.5.1 VOXLER :	54
3.5.1.1 Présentation de Voxler :	55
3.5.1.2 Processus de traitement des données dans voxler :	56
3.5.1.3 Technique de visualisation 3D utilisée par Voxler :	58
3.5.1.4 Interpolation des données dans Voxler :	58
3.5.1.5 Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec VOXLER :	59
3.5.1.6 Essai de modélisation sous Voxler :	60
3.5.1.7 Résultats : Modèle obtenus :	65
3.6.1MODFLOW :	66

3.6.1.1	Présentation de MODFLOW :	66
3.6.1.2	Le processus de traitement des données dans MODFLOW :	67
3.6.1.3	Techniques de visualisation utilisées par MODFLOW :	68
3.6.1.4	Interpolation des données dans MODFLOW :	69
3.6.1.5	Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec MODFLOW :	69
3.6.1.6	Exemple numérique d'études avec MODFLOW :	71
3.7.1	GMS :	74
3.7.1.1	Présentation de GMS :	74
3.7.1.2	Processus de traitement des données dans GMS :	75
3.7.1.3	Technique de visualisation en 3D utilisé par GMS :	76
3.7.1.4	Interpolation des données dans GMS :	76
3.7.1.5	Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec GMS :	77
3.7.1.6	Essai de modélisation sous GMS :	78
3.8.	Les données obligatoires et les données facultatives dans les trois logiciels : MODFLOW, GMS, VOXLER :	84
3.8.	Méthodologie générale de la modélisation des nappes souterraines :	84
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>89</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Différents types des nappes [4].....	5
Figure 2 : Typologie des nappes .....	8
Figure 3 : l'arrangement des grains [10].....	10
Figure 4 : la porosité efficace [10] .....	11
Figure 5 : typologie des porosités [10].....	12
Figure 6: Vitesse d'écoulement en fonction de la porosité [12] .....	13
Figure 7 : la perméabilité d'eau [13].....	14
Figure 8 : Représentation schématique des paramètres hydraulique d'un aquifère saturé [16] .....	17
Figure 9 : le coefficient d'emmagasinement dans une nappe libre et une nappe captive [17] .....	18
Figure 10 : Cône de rabattement en fonction de la perméabilité et du débit [10].....	20
Figure 11 : Cône de rabattement en fonction du coefficient d'emmagasinement et de débit [10].	21
Figure 12 : Vue 3D d'un Modèle numérique du Terrain (MNT).....	27
Figure 13 : Types de représentation MNT selon la nature du terrain [24].....	28
Figure 14 : MNT issue du SRTM du nord Algérien numérique de terrain [26] .....	30
Figure 15 : Exemple de log de forage pour nappe d'eau [32] .....	34
Figure 16 : Schéma explicatif du niveau piézométrique [36] .....	36
Figure 17 : Tube plongeur (sifflet de relevé) [37].....	38

Figure 18 : Système de mesure automatique des niveaux piézométrique [37] .....	39
Figure 19 : Principe de l'interférométrie radar par satellite [39].....	39
Figure 20 : illustration d'un système d'une tomographie de rétivité électrique [40] .....	40
Figure 21 : Exemple de classification des objets géospatiales sous forme de couches d'information [45].....	45
Figure 22:Etapes pour représentation des couches géologiques et piézométriques .....	54
Figure 23 : Interface du logiciel Voxler v4 [46] .....	56
Figure 24 :Processus de traitement dans Voxler .....	57
Figure 25 : Visualisation 3D des volumes d'eau souterraines sur Voxler à partir d'un champ scalaire.....	58
Figure 26 : Représentation 3D montrant les variations spatiales .....	62
Figure 27:Modélisation 3D de la perméabilité des sous-sols à partir des données de forage Algérien.....	65
Figure 28 : Vue par couches des cellules de la grille à différences finies du modèle MODFLOW [47] .....	67
Figure 29 : Processus de traitement des données dans MODFLOW .....	68
Figure 30:Trajectoires des particules et positions après 1000 jours pour le sous-problème 2A.....	73
Figure 31:Vue en perspective tridimensionnelle des trajectoires des particules et des positions après 1000 jours pour le sous-problème 2A .....	74
Figure 32 : Interface de Ground water Modeling system [49].....	75
Figure 34:Modèle en 3D ( Perméabilité par rapport à l'élévation ) sous GMS .....	81
Figure 35 : Répartition tridimensionnelle de la perméabilité dans le modèle GMS .....	82

Figure 36: processus de modélisation des eaux souterraines .....85

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Grandeurs des valeurs de porosité totale et efficace [11].....	12
Tableau 2 : grandeur de coefficients de perméabilité [14].....	16
Tableau 3 : Les avantages et les inconvénients de la méthode manuelle.....	37
Tableau 4 : Le profil de résistivité électrique le long d'une ligne de mesure (Y = 300). Sur l'axe horizontal X.....	60
Tableau 5: les données d'un forage Algérien à Oran.....	63
Tableau 6 : Attribution des colonnes.....	64
Tableau 7 : Les paramètres hydrauliques et structuraux du modèle de suivi de particules dans MODFLOW 6 .....	72
Tableau 8 : Attribution des colonnes.....	78
Tableau 9 : Attribution des colonnes (Wells).....	79
Tableau 10 : Création du grille.....	80
Tableau 11 : les données obligatoires et les données facultatives dans Voxler,Gms,Modflow .....	84

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Introduction Générale

Les nappes aquifères jouent un rôle essentiel dans l'équilibre écologique et le développement humain. Elles constituent une source d'eau douce souterraine indispensable pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie. En période de sécheresse, elles permettent de maintenir l'approvisionnement en eau lorsque les ressources de surface deviennent insuffisantes. De plus, elles participent à la régulation du cycle hydrologique en alimentant les rivières et les zones humides. [1]

La prospection et l'exploitation des nappes aquifères sont des processus complexes nécessitant une compréhension approfondie de l'hydrogéologie. L'identification des nappes repose sur des méthodes géophysiques telles que la tomographie électrique et la sismique réflexion, ainsi que sur des techniques de forage exploratoire. L'exploitation durable exige des outils de modélisation avancés comme MODFLOW, FEFLOW et Hydro Géosphère, permettant de simuler l'écoulement des eaux souterraines et d'évaluer l'impact des prélèvements.

Le présent travail nous permet d'étudier la méthodologie de modélisation 3D des nappes aquifères à partir des quatre chapitres comme suite :

Chapitre 01 : il est consacré aux définir les nappes aquifères, leur typologie et leurs propriétés hydrodynamiques. Il met en avant leur rôle crucial dans la gestion des ressources en eau et les problèmes liés à leur surexploitation et contamination.

Chapitre 02 : Ce chapitre explique les méthodes de collecte des données, incluant les relevés topographiques (MNT, GPS), les études géophysiques, la collecte des données climatiques et hydrologiques. L'usage des SIG et les défis liés à la collecte seront également abordés.

Chapitre 03 : L'objectifs de ce chapitre est de présenter les logiciels de modélisation des nappes aquifères avec leurs avantages et limites. Il aborde aussi les techniques de visualisation 3D et la représentation des couches géologiques.

**CHAPITRE 01 : CONCEPTS  
GÉNÉRAUX SUR LES  
NAPPES AQUIFÈRES**

# Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

## 1.1 Introduction :

Les nappes aquifères jouent un rôle fondamental dans la gestion des ressources en eau, en assurant l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et le soutien aux écosystèmes aquatiques. Ces réservoirs souterrains, formés par l'accumulation d'eau dans les formations géologiques perméables, constituent une ressource essentielle, notamment dans les régions où les eaux de surface sont limitées ou soumises à des variations saisonnières importantes. La compréhension des nappes aquifères repose sur plusieurs concepts clés. Ce chapitre il est consacré aux leur définition, leur typologie (libres, captifs, multicouches) et leurs propriétés hydrodynamiques telles que la perméabilité, la porosité et la transmissivité. Ces caractéristiques influencent directement la disponibilité et la qualité de l'eau souterraine. Le terme eaux souterraines est généralement réservé à l'eau qui se trouve sous la nappe phréatique, dans les sols et les formations géologiques entièrement saturées.

## 1.2 Définition des nappes aquifères :

Une nappe aquifère, ou aquifère, est une formation géologique constituée de roches ou de sédiments suffisamment perméables pour contenir et transmettre de l'eau souterraine. Ces formations permettent l'écoulement et le stockage de l'eau dans les pores ou les fissures des roches saturées par les eaux de pluie infiltrées. [2]

Les aquifères se distinguent en plusieurs types, notamment :

- **Aquifères libres** : la surface de la nappe fluctue librement dans un milieu non totalement saturé.
- **Aquifères captifs** : la nappe est confinée entre deux couches imperméables, ce qui peut entraîner une pression suffisante pour que l'eau remonte naturellement à la surface lorsqu'un puits est foré, phénomène connu sous le nom d'artésianisme [3], voir figure ci-après.

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

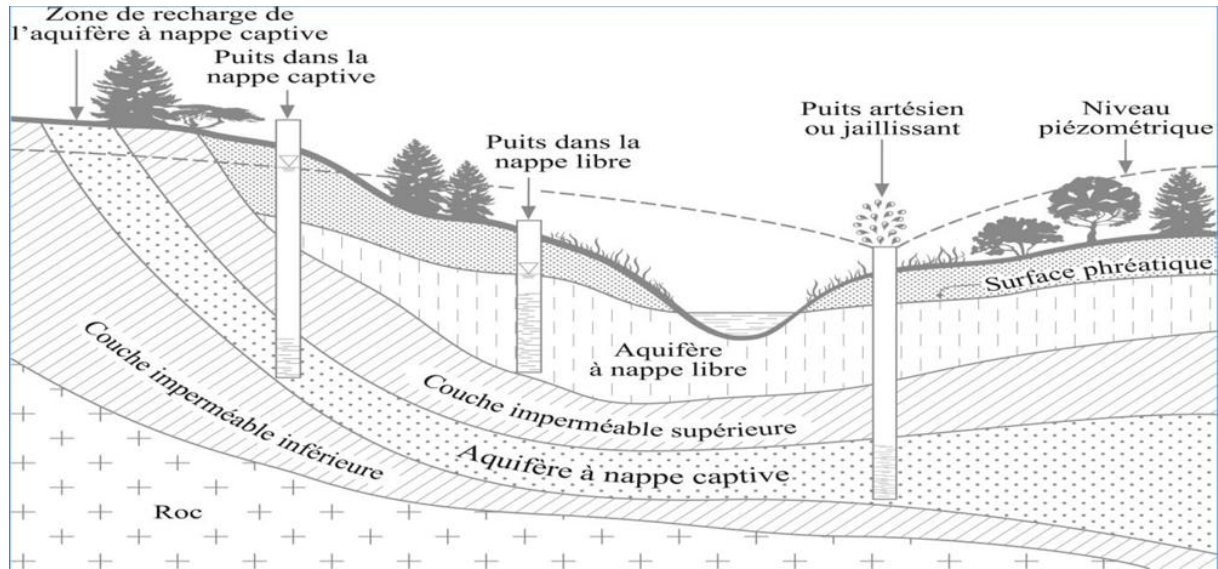


Figure 1: Différents types des nappes [4]

### **Un aquifère :**

Un Aquifère est une formation géologique ou une roche , suffisamment poreuse ou fissurée tout en étant suffisamment perméable , poreux , permettant l'écoulement d'une nappe souterraine et le captage de l'eau . [5]

### **1.3 Les Caractéristiques d'une nappe aquifère :**

Les nappes aquifères présentent plusieurs caractéristiques essentielles qui déterminent leur capacité à stocker et transmettre l'eau souterraine

**Porosité :** La capacité de la roche à contenir de l'eau dans ses pores ou fractures.

**Perméabilité :** La capacité de la roche à laisser circuler l'eau à travers elle.

**Niveau piézométrique :** La hauteur à laquelle l'eau s'élève naturellement dans un forage ou un puits, indiquant la pression de la nappe

## **Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères**

**Transmissivité** : Elle mesure la quantité d'eau qu'un aquifère peut transmettre horizontalement sur toute son épaisseur saturée.

**Profondeur et épaisseur** : La profondeur à laquelle se situe la nappe et son épaisseur influencent l'accessibilité et le volume d'eau disponible. [6]

### **1.4 Typologie des aquifères :**

La typologie des aquifères repose sur leur mode de formation, leur structure, leur composition géologique et leur relation avec l'environnement hydrologique. Voici les principales catégories d'aquifères : [7]

#### Selon la nature géologique

- **Aquifères poreux :**

Constitués de roches sédimentaires comme les graviers, les sables ou les limons, où l'eau circule à travers les pores. Comme les aquifères alluviaux.

- *Aquifères fissurés :*

Formés par des roches dures (granites, basaltes) où l'eau circule dans les fissures ou fractures. Comme les aquifères cristallins ou volcaniques.

- *Aquifères karstiques :*

Formés par des roches calcaires dissoutes par l'eau (processus de karstification), créant des conduits et cavités. Comme: les aquifères des plateaux calcaires.

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

### Selon la configuration hydrogéologique :

- *Aquifères libres (ou non captifs) :*

Le niveau supérieur de l'eau (nappe phréatique) est en contact avec l'atmosphère via la zone non saturée. Comme aquifères superficiels peu profonds.

- *Aquifères captifs (ou confinés) :*

Situés entre deux couches imperméables, la nappe est sous pression. Comme aquifères profonds confinés par des argiles.

- *Aquifères semi-captifs :*

Partiellement confinés, avec une couche semi-perméable qui permet des échanges.

### Selon leur emplacement et dynamique

- *Aquifères alluviaux :*

Localisés dans les vallées fluviales, constitués de sables et graviers, souvent connectés à des rivières.

- *Aquifères côtiers :*

Situés près des zones littorales, soumis à l'influence de l'eau saline.

- *Aquifères fossiles :*

Anciennes nappes accumulées dans des périodes géologiques passées, non renouvelables dans les conditions actuelles.

# Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

## Selon la productivité et l'utilisation

- Aquifères prolifiques : Fournissent de grandes quantités d'eau, souvent utilisés pour l'irrigation ou l'eau potable.
- Aquifères limités : Réserves d'eau réduites ou à recharge lente. [7]

Cette classification est essentielle pour définir une méthodologie de modélisation 3D, car chaque type d'aquifère nécessite des approches spécifiques en termes de collecte de données et de représentation.

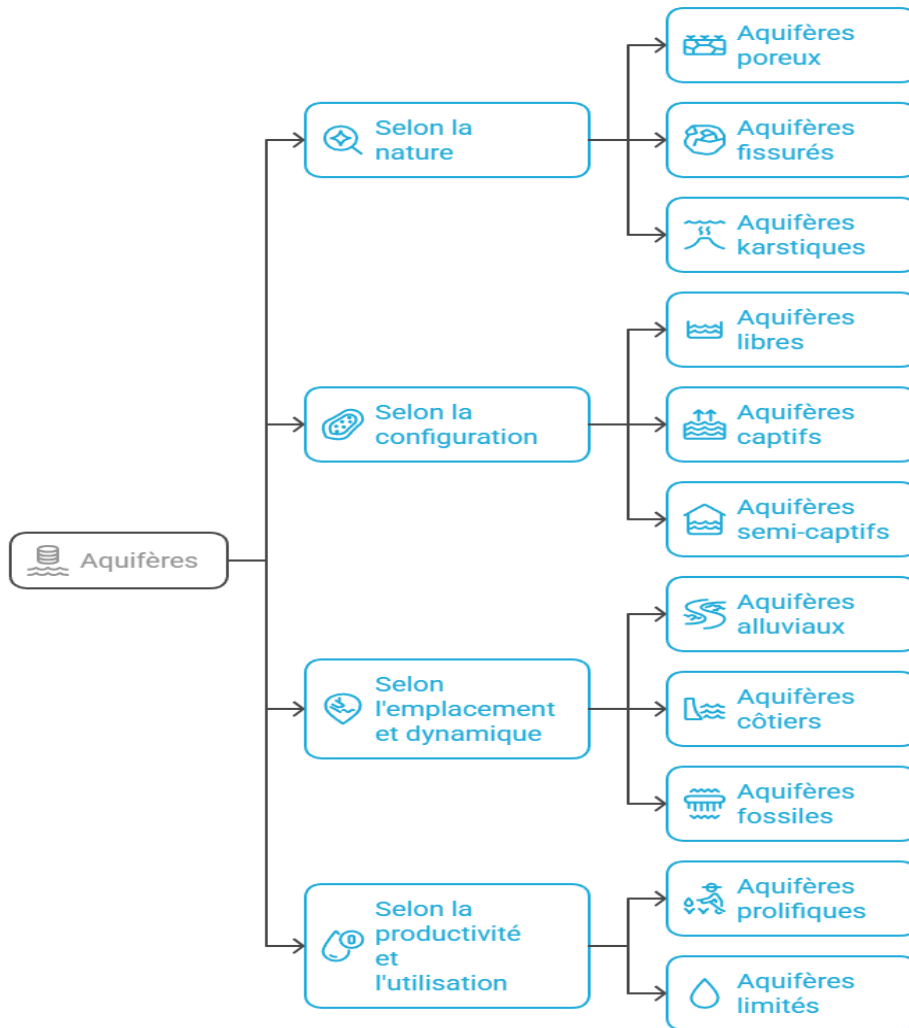


Figure 2 : Typologie des nappes

# **Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères**

## **1.5 Les propriétés hydrodynamiques :**

Les paramètres hydrodynamiques sont des indices qui définissent l'aptitude de l'aquifère à récupérer et à délivrer l'eau. Ils sont indispensables pour connaître l'aquifère et ses volumes d'eau exploitables par un puits. [8]

### **► Définition d'un paramètre hydrodynamique :**

Tout paramètre physique définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir, à permettre son écoulement et à régir les propagations d'influence. Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et la porosité efficace. Certains paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage. Ils peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain, notamment lors des essais de pompages. [9]

### **1.5.1 La porosité :**

La porosité est une propriété caractérisant la proportion de vides au sein d'un matériau, qu'ils soient interconnectés ou non. Elle est définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total du matériau, exprimé en pourcentage ou en fraction. Cette mesure est essentielle pour évaluer la capacité d'un matériau à stocker des fluides, tels que l'eau dans les aquifères. [9]

Il est important de distinguer entre la porosité totale et la porosité efficace :

#### **➤ La porosité totale :**

C'est la Propriété d'un corps ou d'un milieu de comporter des vides interconnectés ou non. La porosité totale représente l'ensemble des vides présents dans une roche. Elle s'exprime par le rapport du volume des vides au volume total du milieu (ex : 0,3 ou 30%).

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

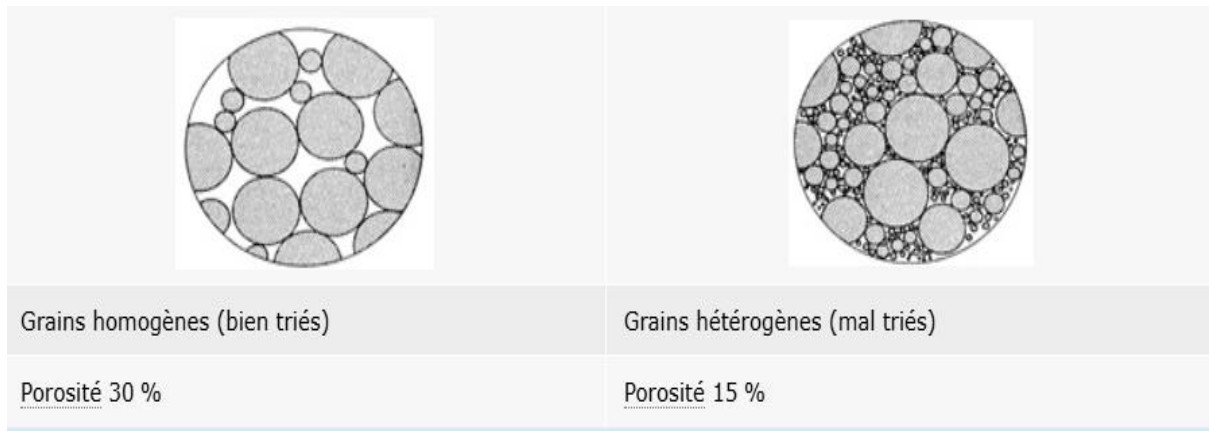


Figure 3 : l'arrangement des grains [10]

### ➤ La porosité efficace :

Est le Rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet, à son volume total .

- Les vides présents dans la roche peuvent être : connectés entre eux, on parle alors de porosité « ouverte » ; sans communication, on parle de porosité « fermée ».
- Dans un milieu poreux, l'eau peut se déplacer uniquement dans les vides interconnectés.

De plus, les grains retiennent l'eau par capillarité et l'empêchent de circuler librement. La porosité efficace représente le volume d'eau mobilisable par gravité.

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

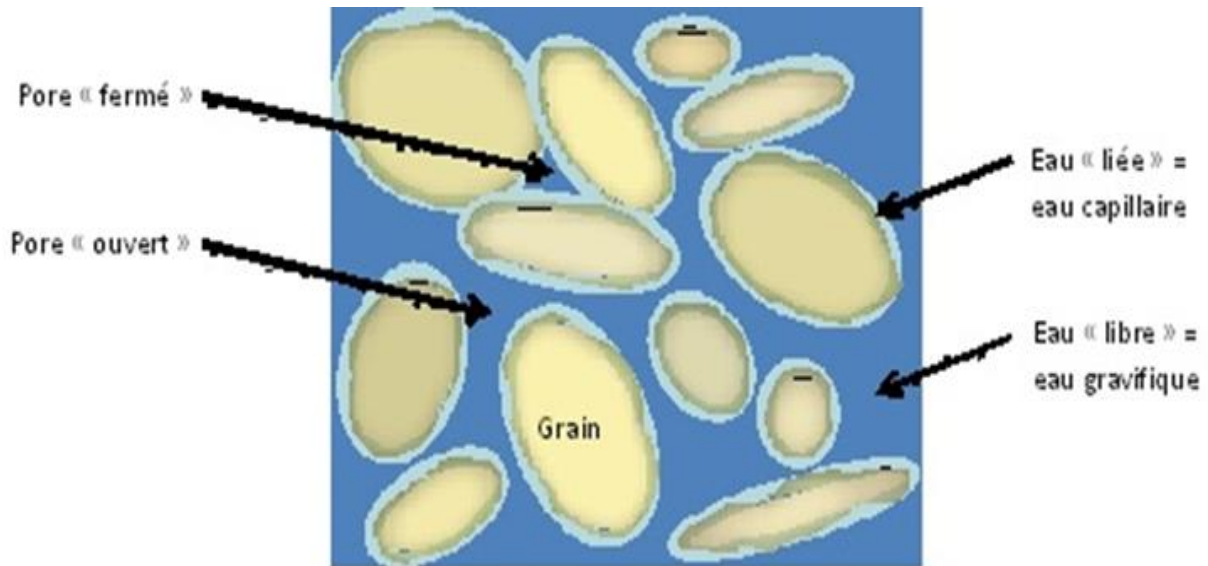


Figure 4 : la porosité efficace [10]

La porosité efficace diminue avec la taille des grains, par exemple les sables présentant plus de porosité « fermée » que les graviers. Elle peut être déterminée en laboratoire ou sur le terrain, par égouttage de la roche

Les eaux souterraines s'écoulent :

- ✓ Dans les pores des roches sableuses. C'est la porosité d'interstice.
- ✓ Dans les fissures et fractures des roches compactes sans pores interconnectés (granites, calcaires...). C'est la porosité de fissure.
- ✓ Dans les karsts, c'est-à-dire dans des réseaux de galeries ouvertes creusées par l'eau. C'est la porosité de karst. [9]

D'une manière générale, les roches meubles sont poreuses « en petit » (porosité d'interstice) et les roches compactes poreuses « en grand » (porosité de fissures et de karst) ce ci montrer dans la figure ci-après :

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

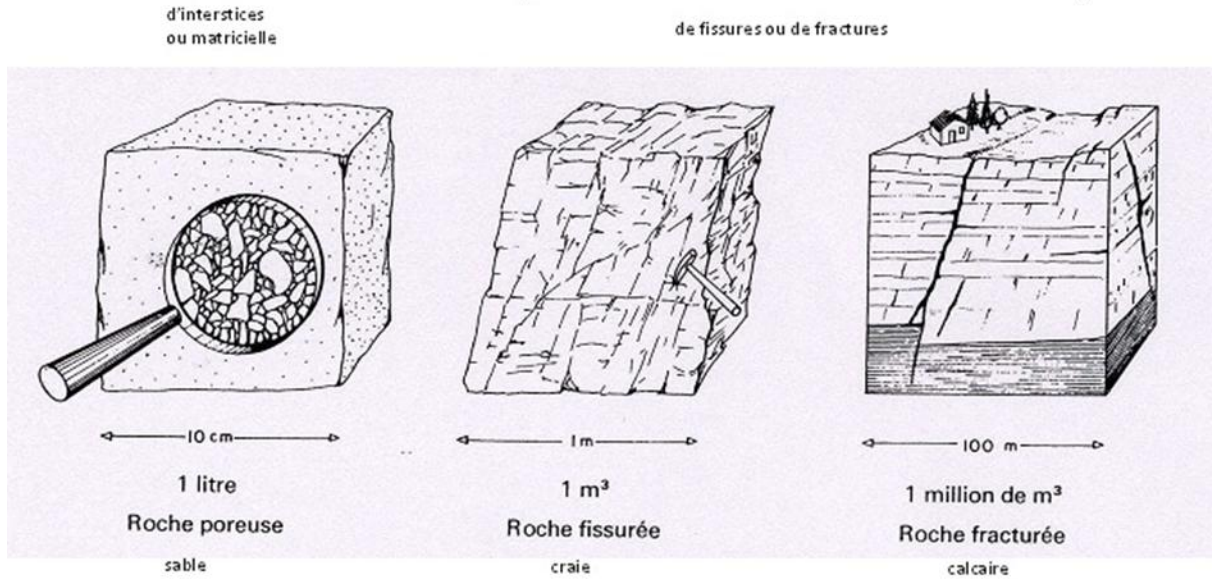


Figure 5 : typologie des porosités [10]

Voici quelques exemples de grandeurs de porosité totale et efficace des matériaux dans le tableau ci-dessous

—	<u>Porosité totale</u>	<u>Porosité efficace</u>
<b>Sables</b>	20 à 40 %	10 à 25 %
<b>Craie</b>	10 à 40 %	1 à 5 %
<b>Calcaires massifs fissurés</b>	1 à 10 %	1 à 5 %
<b>Argiles</b>	40 à 50 %	1 à 2 %

Tableau 1 : Grandeurs des valeurs de porosité totale et efficace [11]

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

Dans les terrains formés de roches meubles (sables, graviers...), les eaux souterraines s'écoulent à travers les vides de façon lente et régulière. Au sein des roches compactes présentant de larges fissures (calcaires, granite...), les circulations souterraines sont plus rapides et désordonnées. Comme est présenter dans la figure ci-dessous

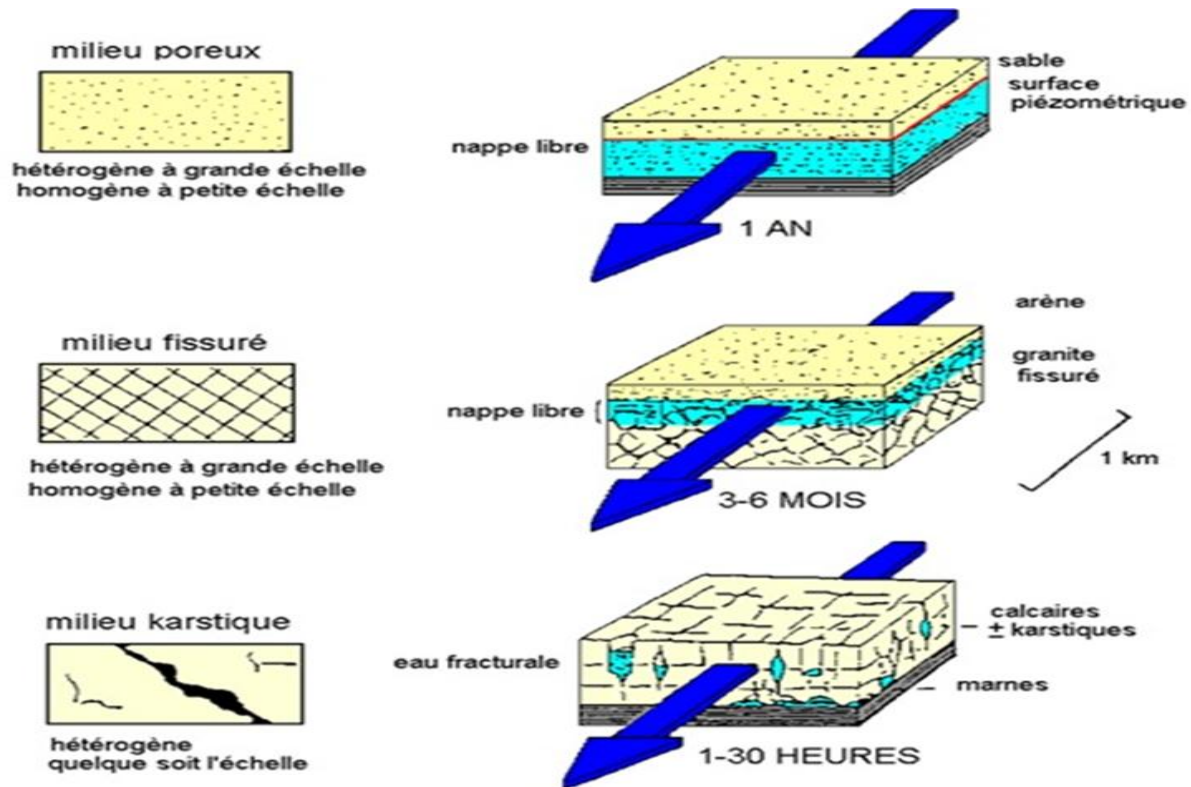


Figure 6: Vitesse d'écoulement en fonction de la porosité [12]

### 1.5.2 La perméabilité :

C'est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz). L'eau ne circule pas en ligne droite dans une nappe et peut emprunter différents chemins pour aller d'un point A à un point B. La distance réelle parcourue par les eaux souterraines est donc plus importante que la distance en ligne droite entre le point A et le point B. Cette distance réelle est difficile à connaître

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

et dépend de la porosité efficace de la roche traversée [12]. Comme est présenter dans la figure ci-dessous

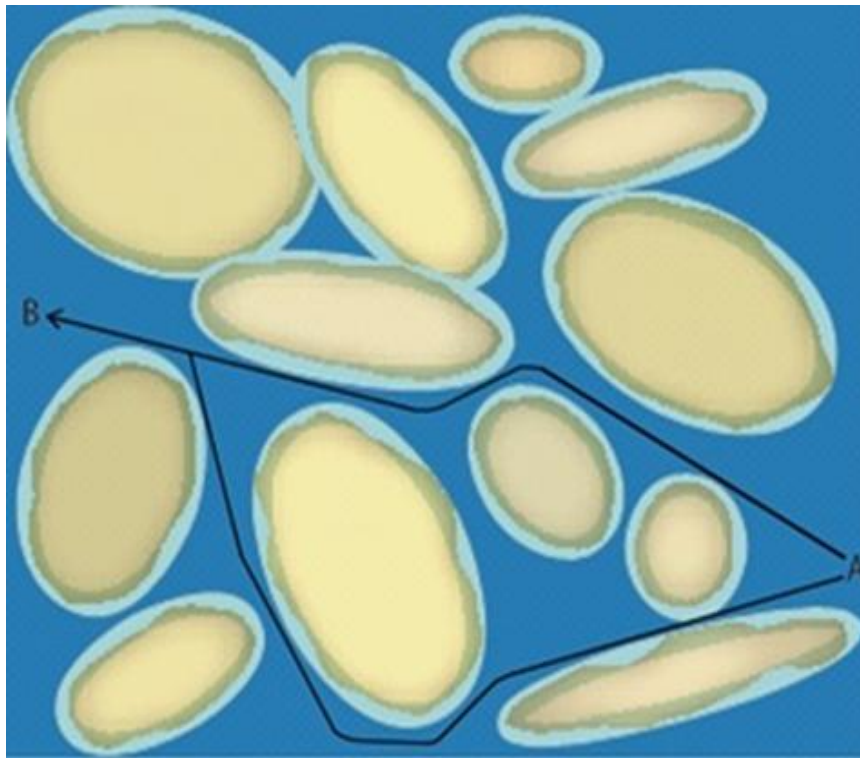


Figure 7 : la perméabilité d'eau [13]

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

### 1.5.3 Le coefficient de perméabilité (de Darcy) :

Le coefficient de perméabilité, également appelé perméabilité ou conductivité hydraulique, est une propriété caractérisant la capacité d'un milieu poreux à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Il est défini par la loi de Darcy, qui exprime le débit d'un fluide traversant un matériau poreux en fonction de la perméabilité du milieu, du gradient de pression et des propriétés du fluide. [14]

La loi de Darcy est formulée comme suit :

$$Q=K \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

Où :

- **Q** est le débit volumique du fluide (m<sup>3</sup>/s),
- **K** est le coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique du milieu poreux (m/s),
- **A** est la surface de la section transversale à l'écoulement (m<sup>2</sup>),
- **ΔH** est la différence de charge hydraulique entre les deux points considérés (m),
- **L** est la longueur du trajet d'écoulement (m).

Le coefficient de perméabilité **K** dépend des caractéristiques du milieu poreux, telles que la taille et la forme des pores, ainsi que de la viscosité et de la densité du fluide. Il est essentiel dans les domaines de l'hydrogéologie et de la mécanique des sols pour évaluer la facilité avec laquelle les fluides, comme l'eau, peuvent se déplacer à travers les formations géologiques ou les matériaux de construction.

Voici quelques exemples de grandeurs de porosité totale et efficace des matériaux dans la tableau ci-dessous

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

Lithologies	Coefficient de perméabilité
graviers	10-2 m/s
sables	10-2 à 10-5 m/s
craie	10-3 à 10-5 m/s
argiles	10-9 à 10-13 m/s

Tableau 2 : grandeur de coefficients de perméabilité [14]

### 1.5.4 La transmissivité :

La transmissivité est un paramètre hydrodynamique clé en hydrogéologie, définissant la capacité d'un aquifère à transmettre l'eau à travers sa section saturée. Elle est déterminée par le produit de la perméabilité hydraulique du matériau constituant l'aquifère ( $k$ ) et de l'épaisseur saturée de celui-ci ( $b$ ). Mathématiquement, cela s'exprime par :

$$T = k \times b$$

Où :

- **T** est la transmissivité (en  $m^2/s$ ),
- **K** est le coefficient de perméabilité (en  $m/s$ ),
- **B** est l'épaisseur saturée de l'aquifère (en  $m$ ).

Cette relation indique que la transmissivité dépend à la fois de la nature du matériau (sa perméabilité) et de l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère. Une transmissivité élevée suggère

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

que l'aquifère peut transmettre de grandes quantités d'eau, ce qui est crucial pour évaluer le potentiel d'approvisionnement en eau d'un aquifère et pour concevoir des systèmes de pompage efficaces. [15] comme ça montre dans la figure ci-après

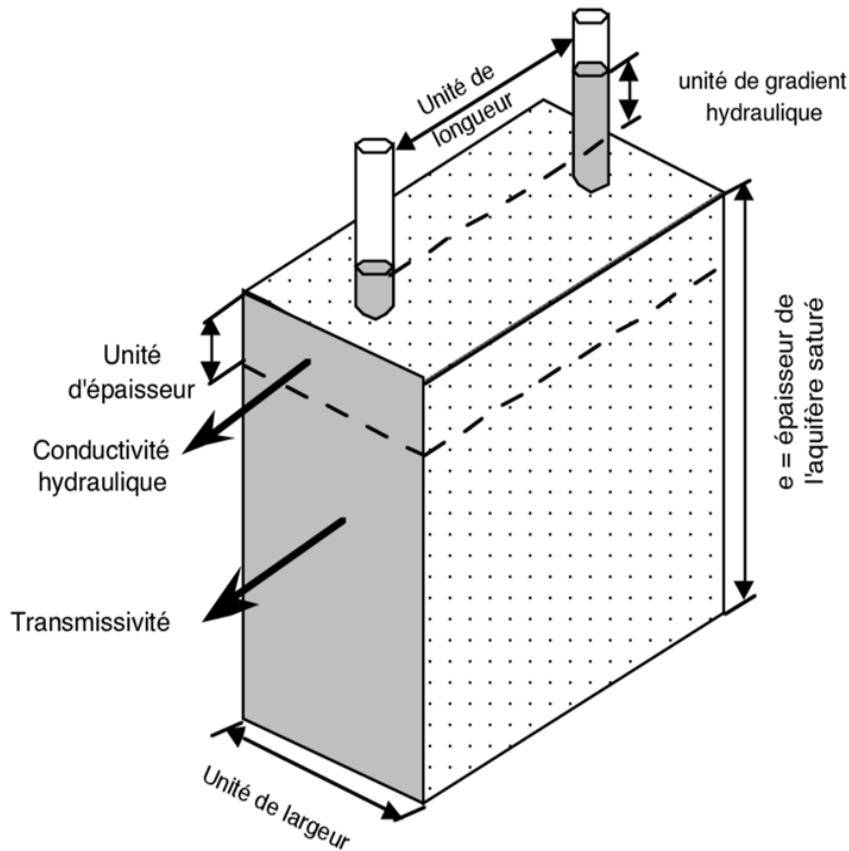


Figure 8 : Représentation schématique des paramètres hydraulique d'un aquifère saturé [16]

### 1.5.5 Le coefficient d'emmagasinement :

Le coefficient d'emmagasinement est défini comme le volume d'eau qui est libéré ou emmagasiné par unité de surface de l'aquifère pour une variation unitaire du niveau piézométrique (différence de pression ou de hauteur de la nappe). Cela dépend de la nature de l'aquifère (sa porosité, sa perméabilité et la capacité des roches ou sols à stocker l'eau) Il est exprimé en unités de mètres cubes d'eau par mètre carré de surface pour une variation de la hauteur de la nappe d'un mètre.

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

S'exprimer par :  $S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h}$

Où :

- ▶  $\Delta V$  est le volume d'eau qui a été stocké ou qui a quitté l'aquifère,
- ▶  $A$  est la surface de l'aquifère considérée,
- ▶  $\Delta h$  est la variation du niveau de la nappe (ou pression) . [15]

Voici une Comparaison entre le coefficient d'emmagasinement dans une nappe libre et une nappe captive dans la figure ci-dessous

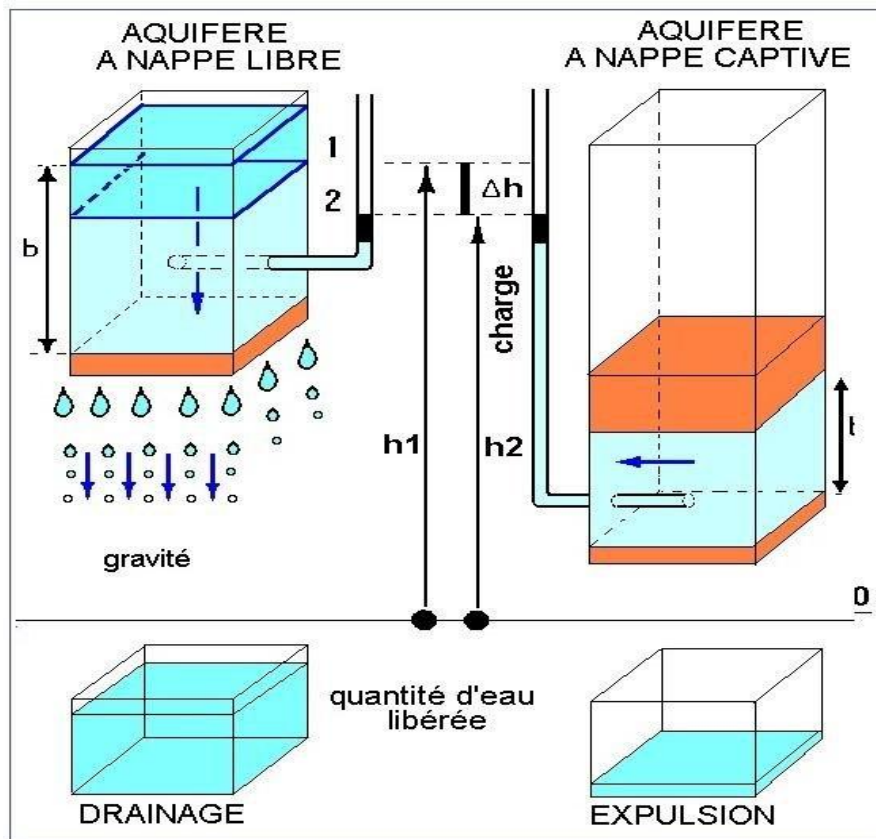


Figure 9 : le coefficient d'emmagasinement dans une nappe libre et une nappe captive [17]

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

### 1.5.6 Le débit spécifique :

Le débit spécifique  $Q_s$  est défini comme le volume d'eau qui traverse une section verticale de l'aquifère (généralement en mètres carrés) par unité de temps, divisé par la surface de cette section. Il permet de mesurer l'efficacité de l'aquifère à transmettre l'eau. Plus le débit spécifique est élevé, plus l'aquifère peut transmettre de l'eau .

Il peut être formulé ainsi :  $Q_s = \frac{Q}{A}$

Où :

- ▶  $Q_s$  est le débit spécifique (en  $m^3/s/m^2$ )
- ▶  $Q$  est le débit total (en  $m^3/s$ ) qui traverse la section de l'aquifère
- ▶  $A$  est la surface de cette section (en  $m^2$ )

On va montrer le débit spécifique selon les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère dans les figures 10 et 11 ci-dessous :

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

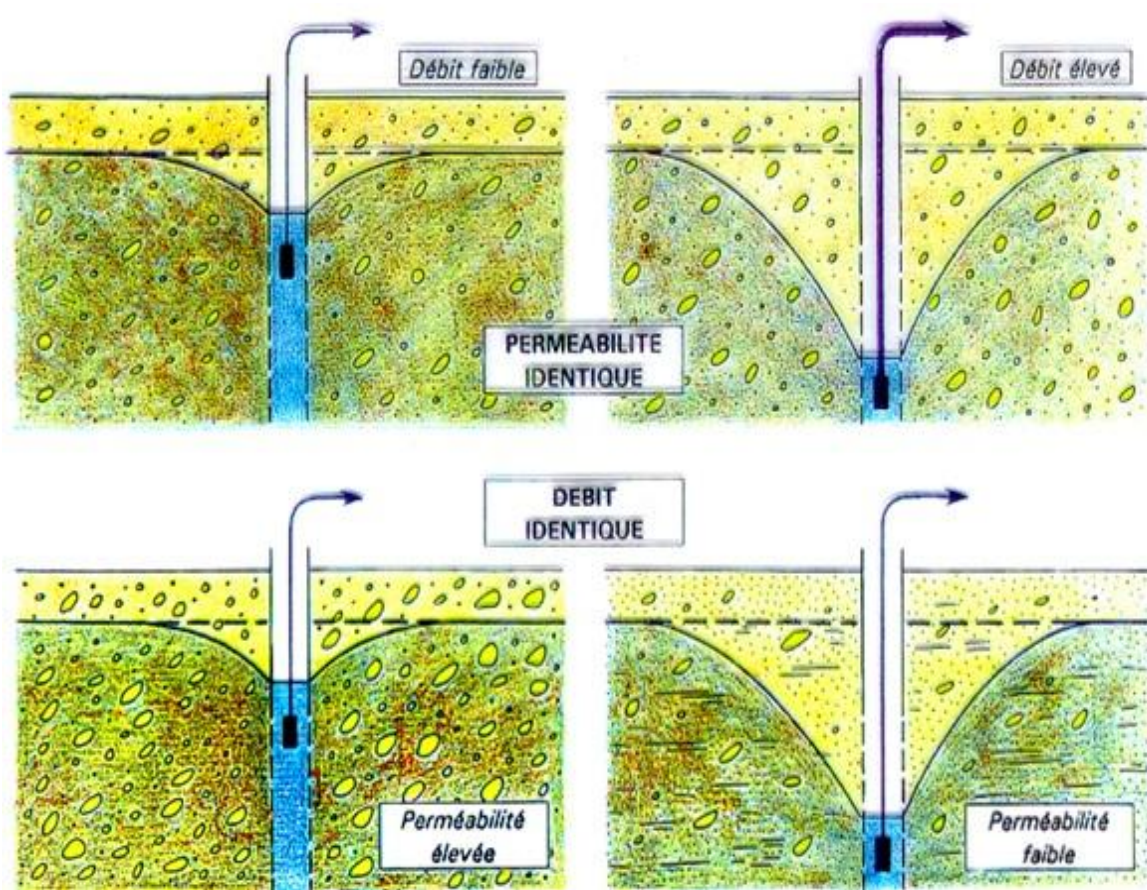


Figure 10 : Cône de rabattement en fonction de la perméabilité et du débit [10]

## Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères

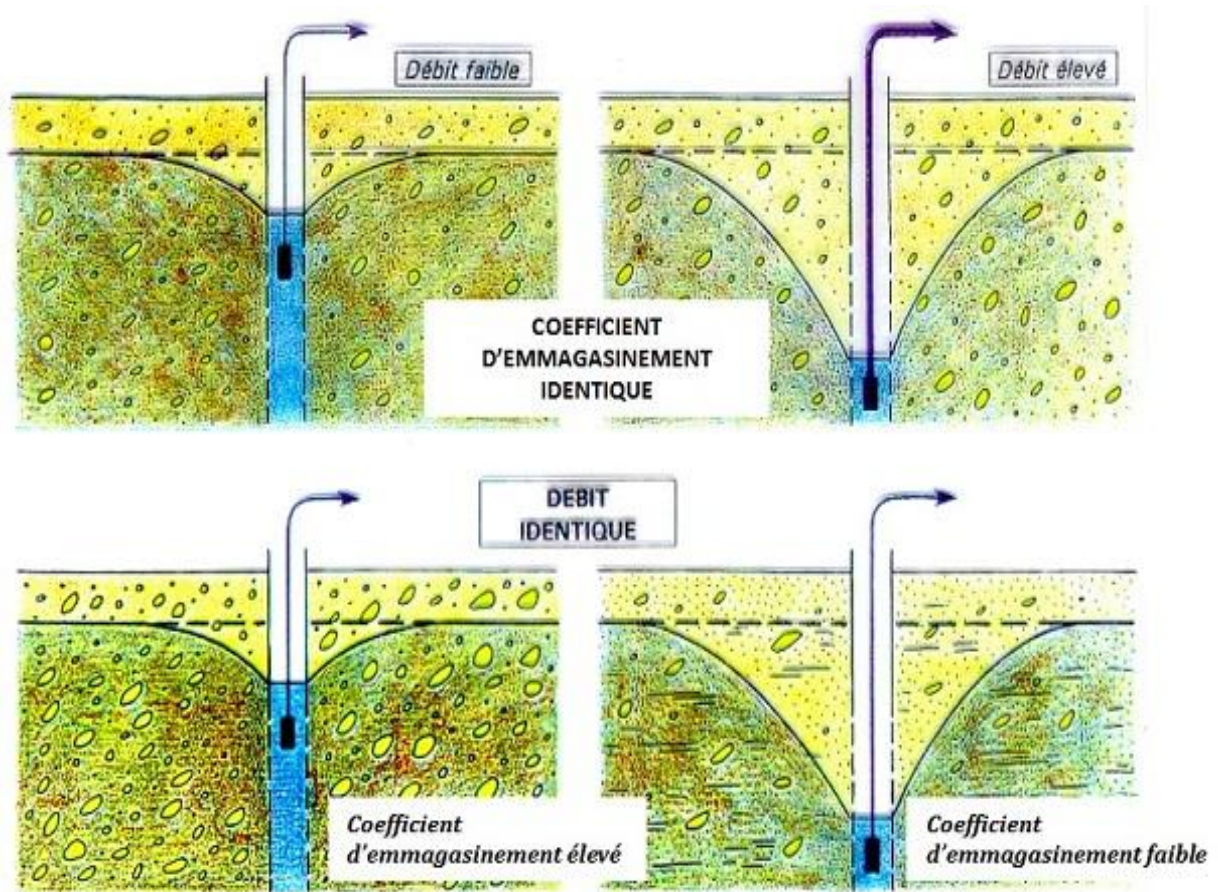


Figure 11 : Cône de rabattement en fonction du coefficient d'emménagement et de débit [10]

## **Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères**

### **1.6 Importance des nappes dans la gestion des ressources en eau:**

Les nappes phréatiques représentent une ressource essentielle en eau potable pour des milliards de personnes dans le monde, fournissant environ 50 % de l'eau consommée à l'échelle mondiale. Elles assurent une alimentation stable et de haute qualité, en particulier dans les régions arides. L'irrigation agricole est l'un des principaux usages des nappes, notamment dans des zones comme le bassin méditerranéen, où l'agriculture dépend fortement de ces prélèvements pour garantir la sécurité alimentaire. Cependant, cette exploitation peut conduire à une surexploitation des ressources. Les nappes jouent également un rôle crucial dans la régulation du cycle hydrologique, en contribuant à la recharge des rivières et des zones humides durant les périodes de sécheresse, assurant ainsi un débit écologique minimal pour préserver les écosystèmes. Considérées comme une "réserve stratégique" d'eau, elles sont particulièrement importantes en cas de sécheresse ou de crise hydrique, mais leur gestion nécessite une planification rigoureuse pour éviter leur épuisement ou contamination. Enfin, face aux changements climatiques et à la variabilité croissante des précipitations, les nappes souterraines offrent une source d'eau plus stable par rapport aux eaux de surface, dont les flux sont plus vulnérables aux variations climatiques. [18]

### **1.7 Problèmes liés à l'exploitation des nappes:**

L'exploitation excessive des nappes phréatiques entraîne plusieurs problèmes majeurs. Tout d'abord, la baisse du niveau des nappes due au pompage excessif, lorsque les prélèvements dépassent la recharge naturelle, provoque l'assèchement des puits peu profonds et oblige à forer plus profondément, augmentant ainsi les coûts d'extraction. Un autre effet grave est l'affaissement des sols causé par la compaction des couches géologiques après la vidange des nappes, le pompage intensif favorise l'intrusion d'eau salée, contaminant les réserves d'eau douce. La qualité de l'eau se dégrade également à cause des pollutions agricoles comme nitrates, pesticides, industrielles (métaux lourds, hydrocarbures) ou même naturelles (arsenic, fluor). De plus, la surexploitation réduit les débits des rivières et zones humides, privant les écosystèmes de leur source d'eau et menaçant la biodiversité. Ces tensions hydriques génèrent des conflits d'usage entre agriculteurs, industries et villes, avec un risque de marginalisation des petits

## **Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères**

exploitants . Enfin, les impacts économiques sont lourds : coûts supplémentaires pour le traitement de l'eau polluée et baisse de la productivité agricole en cas de pénurie. [19]

### **1.8 Solutions possibles :**

La surexploitation des nappes phréatiques constitue un défi majeur qui nécessite une approche intégrée et multifactorielle. Plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre pour assurer une gestion durable de ces ressources vitales.

Une régulation stricte des prélèvements s'impose. L'instauration de quotas de pompage basés sur les taux de recharge naturelle , permettrait d'équilibrer exploitation et renouvellement des nappes. Ce système devrait s'accompagner d'un suivi rigoureux des niveaux piézométriques, notamment grâce aux technologies satellitaires , et d'une gestion concertée impliquant tous les acteurs concernés . [21]

La recharge artificielle des aquifères représente une autre solution prometteuse. Des techniques comme l'infiltration contrôlée via des bassins spécialisés ou la réutilisation des eaux usées traitées pourraient significativement améliorer la recharge des nappes. Ces méthodes sont particulièrement pertinentes dans les régions où la recharge naturelle est insuffisante. [22]

Dans les zones côtières, des mesures spécifiques sont nécessaires pour contrer l'intrusion saline. La mise en place de barrières hydrauliques et l'établissement de zones tampons protégées permettraient de préserver la qualité des eaux souterraines. Ces solutions techniques doivent s'accompagner d'une réglementation stricte limitant les forages excessifs près des côtes. [23]

La réduction des pollutions diffuses constitue un autre axe majeur. L'adoption de pratiques agricoles durables et un contrôle renforcé des rejets industriels, conformément à la directive-cadre européenne sur l'eau, sont essentiels pour protéger la qualité des nappes. Ces mesures préventives sont souvent plus efficaces et économiques que les traitements curatifs. [24]

En parallèle, le développement d'alternatives à la surexploitation doit être encouragé. Les techniques d'irrigation de précision peuvent réduire considérablement la pression sur les nappes,

## **Chapitre 01 : Concepts généraux sur les nappes aquifères**

tandis que la désalinisation offre des solutions complémentaires dans les régions côtières arides. [23]

Enfin, un cadre juridique renforcé et une coopération internationale sont indispensables. La mise en œuvre de conventions comme celle de l'ONU sur les cours d'eau transfrontaliers et l'intégration des eaux souterraines dans les stratégies d'adaptation climatique permettraient une gestion plus harmonieuse de ces ressources partagées. [25]

### **1.9 Conclusion :**

En conclusion, Ce premier chapitre a permis d'appréhender les fondements essentiels relatifs aux nappes aquifères, en mettant en lumière leur définition, leur typologie ainsi que leurs propriétés hydrodynamiques. Il en ressort que les nappes, qu'elles soient libres, captives ou multicouches, jouent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau et dans l'approvisionnement durable en ressources hydriques, tant pour les usages domestiques qu'agricoles et industriels. Cependant, leur exploitation doit être rigoureusement encadrée, car des phénomènes tels que la surexploitation et la contamination peuvent altérer de manière irréversible leur qualité et leur renouvellement. Ainsi, la connaissance approfondie des caractéristiques des nappes constitue un préalable indispensable à une gestion rationnelle et durable des ressources en eau souterraine.

CHAPITRE 02 : ÉTAT DE  
L'ART SUR LES TECHNIQUES  
DE COLLECTE DES DONNÉES

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.1 Introduction :**

Ce chapitre se concentre sur les techniques de collecte des données et leur rôle fondamental dans la modélisation 3D des nappes aquifères. Nous examinerons les différentes méthodes et outils permettant d'acquérir des données précises et détaillées, essentielles à la construction de modèles numériques fiables. L'analyse des sources de données, qu'elles soient topographiques, géologiques, hydrologiques ou climatiques, ainsi que leur intégration dans des systèmes adaptés, permettra de mieux comprendre les enjeux liés à la représentation tridimensionnelle des aquifères. Cette revue des approches existantes mettra en évidence les défis et les avancées technologiques dans ce domaine.

### **2.2 Acquisition des données topographiques :**

L'obtention d'une représentation exacte du relief d'une région précise requiert le processus fondamental de la collecte des données topographiques. Dans ce secteur, on utilise principalement deux outils : le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et le Système de Positionnement Global (GPS). Cette présentation examinera les éléments essentiels de ces deux technologies, leurs bénéfices individuels et leur importance dans la collecte de données topographiques . [21]

#### **2.2.1 Modèle numérique du terrain :**

##### **► Définition du MNT :**

Le Modèle Numérique du Terrain (MNT), tel que défini par le professeur Charles L. Miller de l'institut Technologique du Massachusetts dans les années 1955-1960, est une représentation statistique et informatique de la topographie d'une zone géographique. Il est construit à partir des coordonnées X, Y et Z d'un grand nombre de points choisis et peut être formé par des entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau) ou surfaciques (facettes), ou encore sous forme de maillage raster (cellules). La qualité d'un Modèle Numérique du Terrain dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré. Il se distingue du Modèle Numérique d'Élévation (MNE), qui est une modélisation du sursol, incluant les bâtiments, la végétation et les infrastructures routière [22].

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

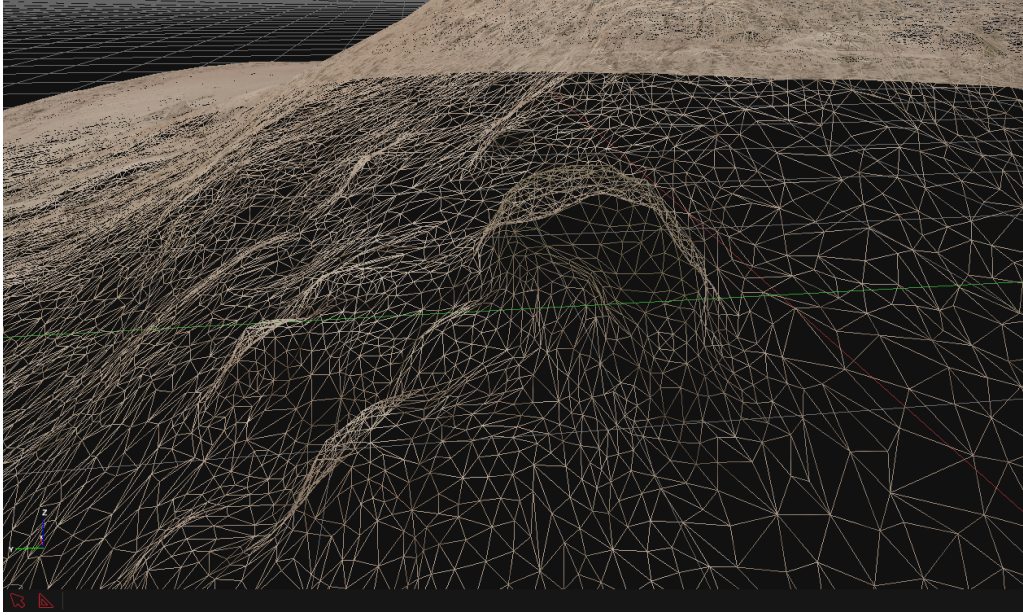


Figure 12 : Vue 3D d'un Modèle numérique du Terrain (MNT)

### **2.2.1.1 Les différents types du modèle numérique du terrain :**

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont des représentations tridimensionnelles de la surface terrestre utilisées pour analyser la topographie et ses interactions avec l'environnement. Ils se déclinent en plusieurs types selon les besoins spécifiques. le MNT classique, qui représente uniquement l'altitude du sol, est utilisé en hydrologie et en gestion des risques naturels. Le modèle numérique de surface (MNS), qui intègre les bâtiments et la végétation, sert notamment aux études urbaines et à la planification des réseaux de communication. et le modèle numérique de hauteur (MNH), obtenu en soustrayant le MNT du MNS, qui permet d'évaluer la hauteur des infrastructures et de la végétation. Il existe également des modèles bathymétriques dédiés à la cartographie du relief sous-marin. Ces modèles sont générés à partir de données issues de la télédétection, du Lidar, de la photogrammétrie ou des relevés GPS, et jouent un rôle clé en hydrogéologie, notamment pour la modélisation des écoulements et l'évaluation des impacts des prélèvements agricoles sur les ressources en eau. [24]

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

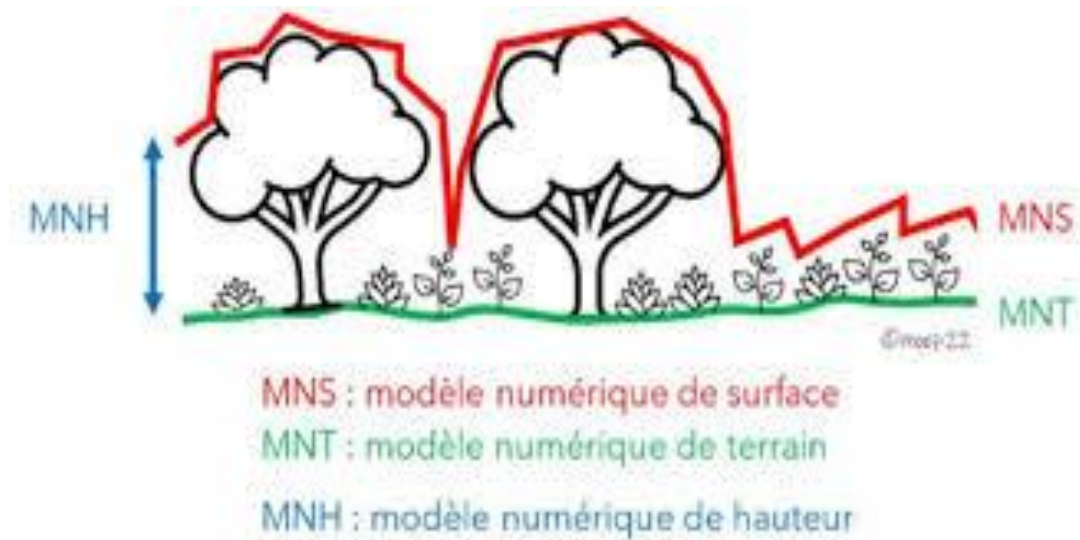


Figure 13 : Types de représentation MNT selon la nature du terrain [24]

### 2.2.1.2 Importance et domaines d'applications du MNT :

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) se sont imposés comme des outils essentiels dans la conception et/ou l'exécution de multiples projets, grâce à leur capacité à économiser du temps et à fournir une précision supérieure. On les utilise pour déterminer les pentes et les expositions, l'ombrage, le ruissellement, les surfaces et volumes, les strates géologiques, les infrastructures et installations, ainsi que pour la conception de cartes topographiques, les corrections géométriques des images aériennes ou satellitaires, l'étude de terrain en géomorphologie et géophysique, la modélisation 3D du relief, l'extraction des caractéristiques topographiques et la réalisation des profils de terrain. En outre, ils constituent la base des systèmes d'information géographique (SIG) et des systèmes de localisation par satellite (GPS). On peut aussi utiliser les MNT pour simuler des vols et établir des trajectoires de survol. Finalement, ils offrent la capacité de représenter et d'organiser des vols en trois dimensions tout en permettant une manipulation quantitative du terrain examiné. Les Modèles Numériques de Terrain se révèlent particulièrement bénéfiques dans les régions inaccessibles, car ils facilitent l'établissement de plans précis sans nécessiter de déplacements physiques. [23].

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.2.1.3 Utilisation du MNT dans le domaine hydrologique :**

L'hydrologie s'appuie de plus en plus sur les Modèles Numériques de Terrain (MNT), dont l'utilisation a été grandement facilitée par les avancées en géomorphologie, tant en matière de construction que d'analyse. Les Modèles Numériques d'Altitude (MNA), caractérisés par des résolutions de plus en plus fines, sont désormais accessibles sur de nombreuses plateformes en ligne et couvrent presque l'ensemble du globe. Cette disponibilité permet une caractérisation morphométrique précise des bassins versants à grande échelle, offrant ainsi des opportunités pour diverses applications, notamment la modélisation des crues et des phénomènes d'inondation . Le MNA le plus couramment utilisé est celui issu de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 3), offrant une résolution de 90 m). Les données issues de cette mission sont particulièrement prisées dans les études hydrologiques à grande échelle [25], car elles garantissent une couverture homogène et permettent des analyses fiables sur de vastes régions Dans le contexte algérien, l'exploitation de ces MNT peut enrichir les études de synthèse menées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Ces études portent notamment sur l'estimation des débits de crue, l'évaluation des apports en eau de surface (et l'estimation des volumes régularisables . Par ailleurs, les travaux de ont démontré que les paramètres morphométriques d'un bassin versant, dérivés d'un MNA SRTM, contribuent à améliorer la précision des modèles de calcul des hydrogrammes de crue. Cette approche pourrait également s'avérer pertinente pour la modélisation 3D des nappes aquifères, en optimisant l'évaluation des interactions entre les écoulements de surface et les systèmes hydrogéologiques sous-jacents. [31]

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

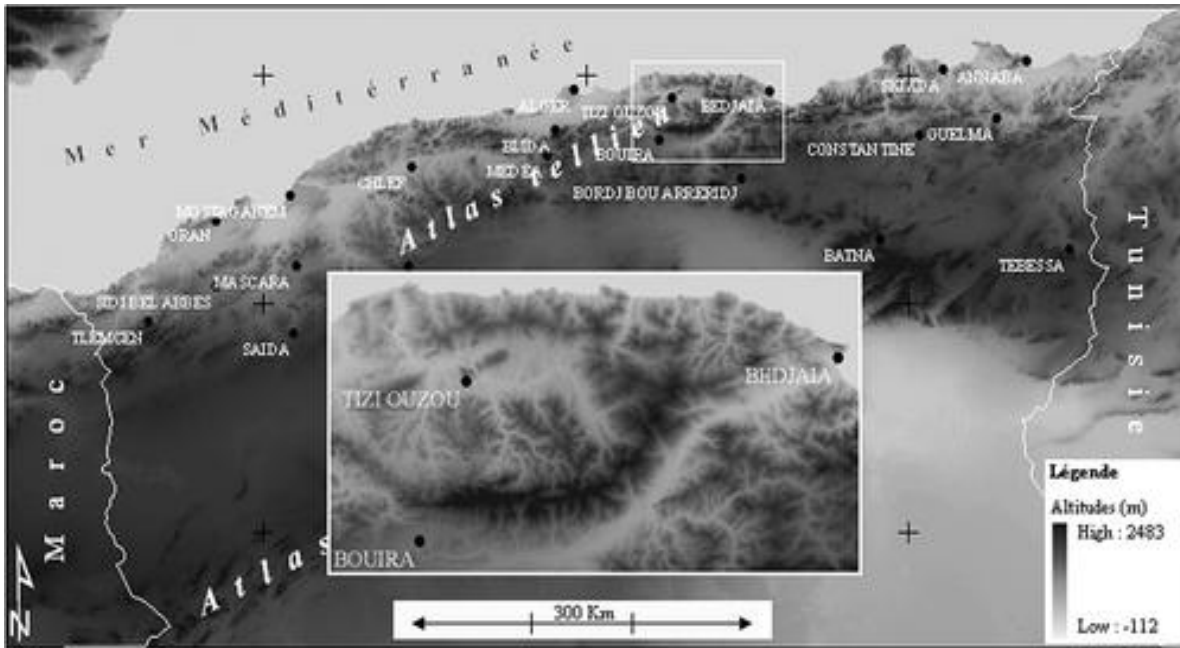


Figure 14 : MNT issue du SRTM du nord Algérien numérique de terrain [26]

### 2.2.2 Le Système de positionnement global :

Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites permettant de déterminer avec précision des coordonnées géographiques en tout point du globe. Développé par le département de la Défense des États-Unis dans les années 1970 à des fins militaires, il a été rendu accessible au public et est aujourd'hui largement utilisé en cartographie et en topographie. Son déploiement s'est achevé en 1995 avec une constellation de 24 satellites en orbite. En topographie, le GPS joue un rôle essentiel dans l'acquisition des données altimétriques en permettant de relever avec précision la position et l'altitude des points sur le terrain. Il existe plusieurs techniques de mesure, notamment le GPS différentiel (DGPS) et le GPS RTK (cinématique en temps réel), qui améliorent la précision des relevés jusqu'à quelques centimètres. Grâce à ces technologies, le GPS est utilisé pour compléter et affiner les Modèles Numériques de Terrain (MNT), facilitant ainsi la modélisation des reliefs et l'analyse des interactions entre la surface terrestre et les ressources en eau [27]

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.2.2.1 Importance du GPS dans la collecte de données géospatiales pour les études hydrogéologiques :**

Le GPS (Global Positioning System) joue un rôle essentiel dans la collecte et l'analyse des données géospatiales utilisées pour les études hydrogéologiques. Grâce à sa précision et à sa capacité de géoréférencement, il facilite la localisation des points d'intérêt et l'intégration des données dans les systèmes de modélisation. [28] .

### **2.2.2.2 Applications du GPS dans l'étude des nappes aquifères :**

En hydrogéologie, le GPS est un instrument crucial, particulièrement pour le suivi et la régulation des nappes aquifères. Il facilite l'identification précise des emplacements de mesure, comme ceux des piézomètres, et garantit la cohérence spatiale des informations recueillies. Cette exactitude est essentielle pour étudier les fluctuations du niveau piézométrique et pour construire des modèles d'écoulements souterrains. Par exemple, une recherche portant sur la piézométrie des systèmes aquifères met l'accent sur la nécessité d'incorporer les données GPS afin de perfectionner les réseaux de surveillance et d'améliorer le schéma des niveaux d'eau souterraine. Par ailleurs, le GPS favorise l'incorporation des informations hydrogéologiques dans des systèmes d'information géographique (SIG), rendant possible une analyse spatiale poussée et une gestion optimisée des ressources aquifères. [29]

## **2.3 . Méthodes de collecte des données géologiques et hydrogéologiques :**

### **2.3.1 Méthode destructive :**

#### **2.3.1.1 Logs de forages :**

Un log de forage est un relevé détaillé, souvent présenté sous forme de diagramme en fonction de la profondeur, qui documente divers paramètres mesurés pendant le processus de forage. Ces paramètres incluent la vitesse d'avancement du forage, ainsi que la densité de la boue utilisée à l'injection et à la sortie. Les logs de forage sont essentiels dans des domaines tels que l'exploration pétrolière et gazière, où ils permettent d'obtenir les caractéristiques physiques des formations

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

souterraines rencontrées. En plus des informations sur la géologie du site, les logs peuvent aussi fournir des données importantes concernant la présence d'eau ou d'autres fluides dans les couches rocheuses traversées, ce qui en fait une ressource précieuse pour les études hydrogéologiques et géologiques. [30]

### **2.3.1.2 Importance des logs de forages :**

Les logs de forage jouent un rôle fondamental dans l'exploration et l'exploitation des ressources souterraines, qu'il s'agisse d'hydrocarbures ou d'eaux souterraines. Ils constituent une méthode non destructive permettant de collecter en temps réel ou en mémoire une grande variété de données géophysiques et pétro physiques tout au long du forage. Ces données sont essentielles pour caractériser les formations traversées, optimiser les opérations de forage et améliorer la prise de décision en matière de gestion des réservoirs et de production.

L'un des principaux avantages des logs de forage est leur capacité à fournir des informations précises sur les propriétés physiques et chimiques des formations géologiques. Ils permettent notamment de déterminer la porosité, la perméabilité, la saturation en fluides, la radioactivité naturelle des roches, ainsi que la résistivité électrique et la vitesse des ondes acoustiques. Ces paramètres sont cruciaux pour identifier les zones productives, évaluer la qualité des réservoirs et détecter d'éventuelles barrières imperméables influençant la migration des fluides.

En complément des méthodes de carottage, qui nécessitent l'extraction d'échantillons physiques des formations souterraines, les logs de forage offrent une alternative plus rapide et plus économique. En effet, le carottage peut être limité par des contraintes techniques et des coûts élevés, alors que les logs permettent une collecte continue de données sur toute la profondeur du puits, réduisant ainsi les incertitudes liées à la variabilité latérale des formations.

Les logs de forage sont également essentiels pour la surveillance et le contrôle des opérations. Ils permettent d'identifier en temps réel des problèmes tels que les pertes de circulation, les casings,

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

les obstructions ou les instabilités du puits. Ils aident également à surveiller l'intégrité des cuvelages et des ciments, garantissant ainsi la sécurité des opérations et la pérennité du puits.

Enfin, dans un contexte de gestion durable des ressources, les logs de forage jouent un rôle clé dans l'évaluation et la modélisation des aquifères. Ils permettent de cartographier la distribution des nappes souterraines, de suivre l'évolution des niveaux piézométriques et d'identifier d'éventuelles contaminations ou intrusions salines. Ces informations sont indispensables pour optimiser les stratégies de gestion des eaux souterraines et assurer une exploitation responsable des ressources naturelles.

Ainsi, les logs de forage représentent une technologie incontournable pour l'exploration, la production et la gestion des réservoirs souterrains. Leur capacité à fournir des données détaillées et continues permet non seulement d'améliorer l'efficacité des opérations de forage, mais aussi de minimiser les risques et d'assurer une exploitation durable des ressources du sous-sol. [31]

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

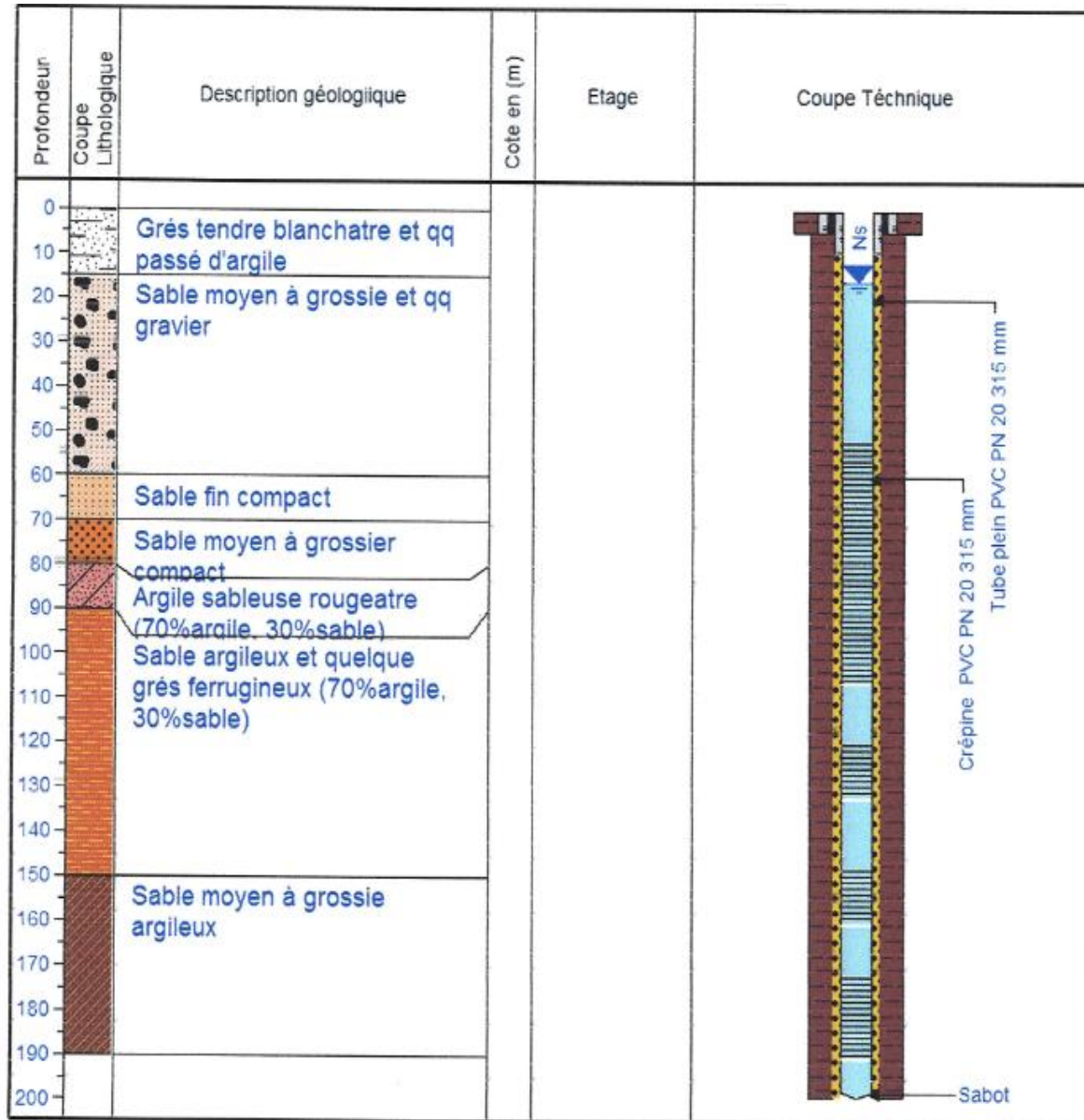


Figure 15 : Exemple de log de forage pour nappe d'eau [32]

### 2.3.2 Méthode non destructive :

#### 2.3.2.1 Études géophysiques :

Une étude géophysique est une méthode d'investigation scientifique qui utilise des techniques de mesure des propriétés physiques de la Terre (telles que la gravité, le magnétisme, la résistivité électrique, la sismique ou la radioactivité) pour étudier la structure, la composition et les

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

caractéristiques du sous-sol. Ces techniques, non destructives et souvent réalisées depuis la surface ou en forage, permettent de cartographier les formations géologiques, d'identifier les ressources naturelles (eau, hydrocarbures, minéraux) et de détecter des anomalies ou des structures cachées [33]

### **2.3.2.2 Les domaines d'utilisation de l'étude géophysique :**

- **L'hydrogéologie** : pour localiser et caractériser les aquifères.
- **L'exploration pétrolière et gazière** : pour identifier les gisements d'hydrocarbures.
- **La prospection minière** : pour détecter les ressources minérales.
- **La géotechnique** : pour évaluer la stabilité des sols et des roches.
- **La protection de l'environnement** : pour surveiller les nappes phréatiques et prévenir les contaminations. [34]

### **2.4 Méthodes de mesure des niveaux piézométriques :**

Le niveau piézométrique est le niveau d'eau relevé dans un forage ou un puits équipé d'un piézomètre. Il représente la hauteur atteinte par l'eau dans un tube en communication avec la nappe souterraine et caractérise la pression de cette nappe en un point donné . Ce niveau peut être mesuré à un instant précis et est souvent représenté sur des cartes piézométriques pour visualiser la répartition et les variations de la surface de la nappe souterraine [35].

Dans ce qui suit une description des divers méthode de mesure de ce type de niveau.

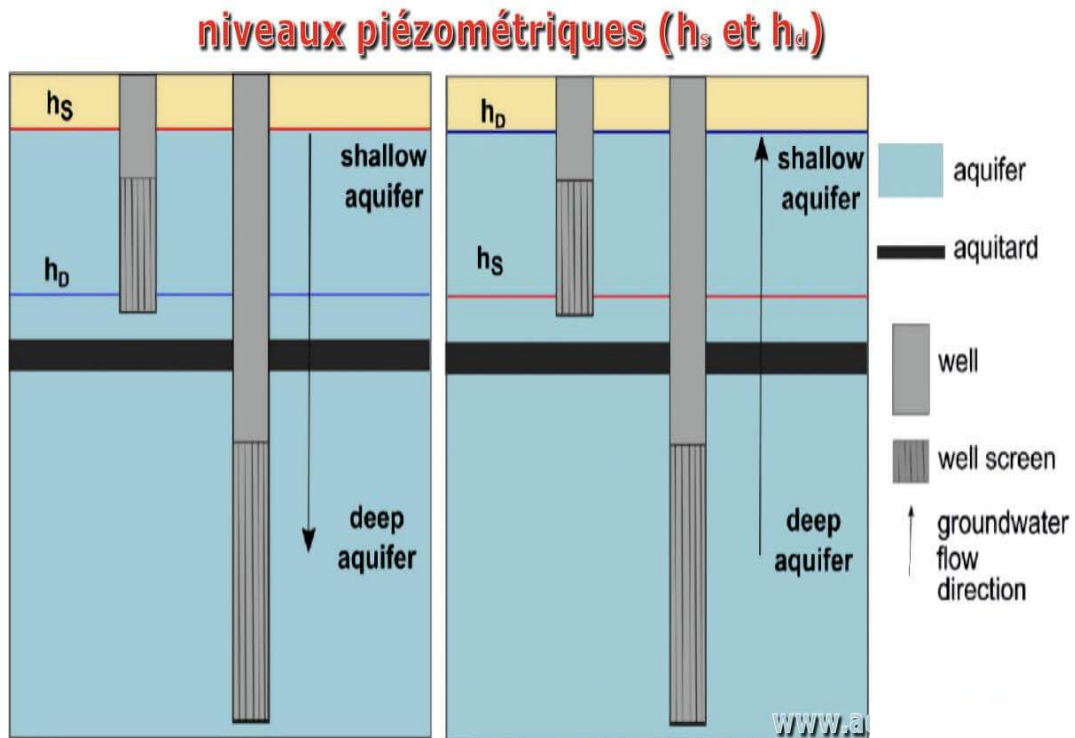


Figure 16 : Schéma explicatif du niveau piézométrique [36]

#### 2.4.1 Méthodes manuelles :

Elles sont simples et couramment utilisées pour des suivis ponctuels.

- **Sonde piézométrique électrique** : Un câble gradué avec une électrode plonge dans le forage jusqu'au contact avec l'eau, ce qui déclenche un signal sonore ou lumine
- **Ruban gradué avec flotteur** : Une bande millimétrée est introduite dans le puits jusqu'au niveau de l'eau.

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

Avantages et inconvénients :

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Fiabilité de la mesure</b>	- Fréquence faible de mesure (déplacements physiques d'un observateur, coût)
<b>Précision au cm près</b>	État/entretien de la sonde (fiabilité): -ruban (coupé, effacé...) -Électrode
<b>Observation directe du niveau, état du piézomètre</b>	Changements d'opérateurs : décalages
<b>Peu de panne</b>	Risque d'erreurs lors du passage au numérique

Tableau 3 : Les avantages et les inconvénients de la méthode manuelle

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

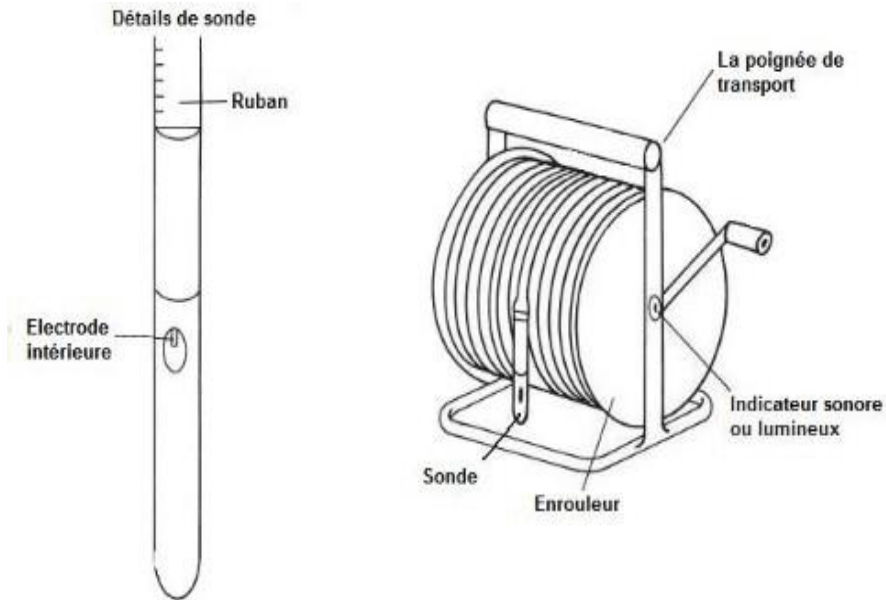


Figure 17 : Tube plongeur (siffler de relevé) [37]

### **2.4.2 Méthodes automatiques :**

Les systèmes de mesure automatiques utilisés en hydrométrie combinent généralement un capteur et un enregistreur (logger), qui peut être numérique ou à papier, et intégré ou externe. Les données recueillies peuvent être extraites de manière manuelle ou transmises à distance grâce à des dispositifs de télétransmission. Parmi les instruments couramment employés, on trouve le flotteur Thalimède, qui mesure le niveau d'eau en fonction de la position d'un flotteur dans une colonne. D'autres technologies incluent les capteurs de pression immergés, qui existent sous deux formes principales : ceux avec mise à l'air libre, permettant de corriger la pression mesurée pour tenir compte de la pression atmosphérique, et ceux fonctionnant en pression absolue, qui nécessitent une correction ultérieure pour obtenir des mesures précises du niveau d'eau . [37]



Figure 18 : Système de mesure automatique des niveaux piézométrique [37]

### 2.4.3 Méthodes indirectes :

Elles sont basées sur des corrélations avec d'autres paramètres physiques.

#### ► Imagerie satellitaire et radar interférométrique :

L'interférométrie radar peut être un outil important pour détecter les variations de subsidence liées aux changements de niveaux piézométriques. [38], sauf que cette méthode est limitée par la nature du sol et la profondeur des eaux sous-terraines .

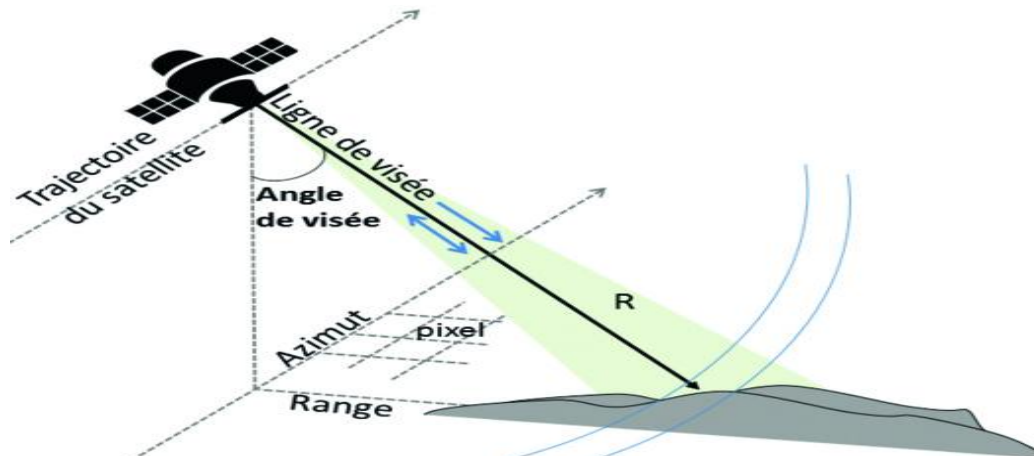


Figure 19 : Principe de l'interférométrie radar par satellite [39]

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

### 2.4.4 Méthodes géophysiques (diagraphies, résistivité électrique) :

Utilisées pour cartographier les variations des niveaux d'eau dans les aquifères , voici la figure ci-dessous qui illustre cette méthode .

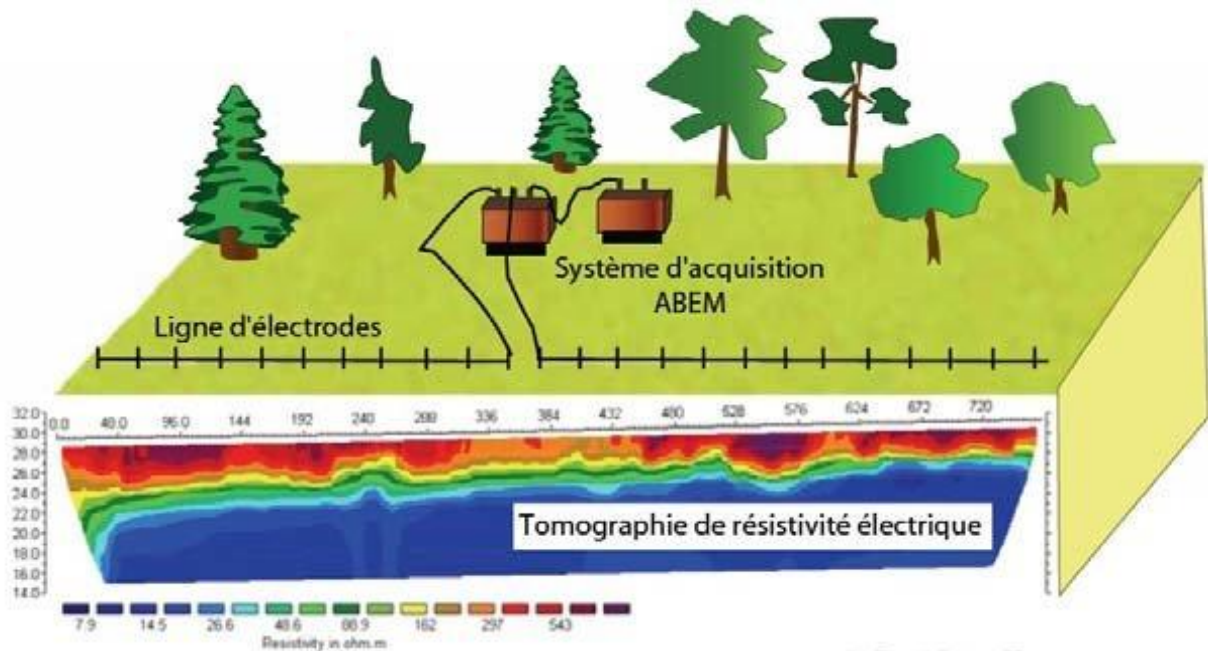


Figure 20 : illustration d'un système d'une tomographie de rétivité électrique [40]

### 2.5 Collecte des données climatiques et hydrologiques :

#### 2.5.1 Les données climatiques :

La collecte des données climatiques et hydrologiques est une étape essentielle pour comprendre et gérer les ressources en eau, prévoir les risques naturels (comme les sécheresses ou les inondations) et planifier les activités agricoles, industrielles ou domestiques. Ces données permettent d'analyser l'impact des conditions météorologiques sur la recharge et la dynamique des eaux souterraines.

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

### 2.5.1.1 Types de données climatiques :

Pour une modélisation fiable, plusieurs paramètres climatiques doivent être collectés :

- ▶ **Précipitations** : Quantité et intensité des pluies influençant l'infiltration et la recharge des nappes.
- ▶ **Température** : Impact sur l'évapotranspiration et le bilan hydrique.
- ▶ **Humidité relative** : Affecte les échanges d'eau entre l'atmosphère et le sol.
- ▶ **Rayonnement solaire** : Influence l'évapotranspiration potentielle.
- ▶ **Vitesse et direction du vent** : Joue un rôle dans l'évaporation [41]

### 2.5.1.2 Sources de données climatiques :

- Stations météorologiques : Données fournies par les agences météorologiques nationales et locales.
- Bases de données globales : Relevés climatiques de la NASA, NOAA, WorldClim, ERA5 (ECMWF).
- Télédétection et satellites : Produits satellitaires pour estimer les précipitations et l'humidité du sol.
- Modèles climatiques régionaux : Simulations fournissant des scénarios climatiques futurs. [42]

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.5.1.3 Intégration des données climatiques dans la modélisation 3D :**

L'intégration des données climatiques dans la modélisation 3D des nappes aquifères repose sur plusieurs étapes clés. Tout d'abord, l'interpolation spatiale des données climatiques est réalisée à l'aide de méthodes comme le Krigeage ou l>IDW (Inverse Distance Weighting) afin d'extrapoler les valeurs sur l'ensemble de la zone d'étude. Ensuite, ces données sont couplées à un modèle hydrogéologique tel que MODFLOW, FEFLOW ou Hydro Géosphère, permettant de simuler l'évolution des nappes en fonction des variations climatiques. Enfin, une étape essentielle de validation et de calibration est effectuée en comparant les résultats obtenus avec des mesures de terrain, notamment les niveaux piézométriques et les débits des sources, afin d'ajuster les paramètres du modèle et d'améliorer sa fiabilité.

### **2.5.2 Les données hydrologiques :**

Les données hydrologiques représentent l'ensemble des informations relatives à la distribution, au mouvement et à la qualité de l'eau dans les systèmes naturels (rivières, lacs, nappes phréatiques, etc.) ainsi que sur les processus hydrologiques qui régissent ces systèmes. Ces données sont essentielles pour comprendre et gérer durablement les ressources en eau. [43].

#### **2.5.2.1 Sources de collecte des données hydrologique :**

- ▶ Stations hydrométriques
  
- ▶ Puits et forages de surveillance
  
- ▶ Satellites de télédétection
  
- ▶ Données historiques et archives

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.6 Apport des SIG pour les nappes aquifères :**

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils essentiels dans la méthodologie de modélisation 3D des nappes aquifères, car ils permettent de structurer, analyser et visualiser les données spatiales nécessaires à la simulation hydrogéologique.

Dans un premier temps, les SIG facilitent l'intégration de différentes sources de données spatialisées, notamment les cartes géologiques, les modèles numériques de terrain (MNT), les données climatiques et hydrogéologiques (précipitations, niveaux piézométriques, perméabilité des sols). Ces informations sont organisées sous forme de couches géographiques qui peuvent être croisées et analysées pour définir les caractéristiques de l'aquifère.

Ensuite, les SIG sont utilisés pour l'interpolation des paramètres hydrogéologiques, comme la perméabilité, la conductivité hydraulique et l'épaisseur des formations aquifères. Des techniques d'interpolation spatiale, telles que le Krigeage ou l'IDW (Inverse Distance Weighting), permettent d'estimer ces valeurs dans des zones non instrumentées et de générer des surfaces continues à partir des données ponctuelles relevées sur le terrain.

Par ailleurs, les SIG sont souvent couplés avec des logiciels de modélisation hydrogéologique 3D, comme MODFLOW, FEFLOW ou Hydro Géo Sphère, pour préparer les données d'entrée et analyser les résultats des simulations. Ils permettent notamment de générer des maillages adaptés à la simulation numérique et de visualiser les flux souterrains en trois dimensions, ce qui facilite l'interprétation des scénarios de gestion des ressources en eau.

Enfin, les SIG jouent un rôle clé dans la validation et la calibration des modèles en permettant de comparer les résultats des simulations avec les données de terrain, notamment les mesures piézométriques et les débits des sources. Cette approche améliore la précision des modèles et aide à la prise de décision pour la gestion durable des nappes aquifère [44]

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

### **2.6.1. Captation et Stockage des Données :**

Les SIG permettent de collecter des données géolocalisées à partir de diverses sources telles que des fichiers vectoriels, raster, des satellites, des drones ou encore des capteurs sur le terrain

Ces données sont ensuite stockées dans des bases de données spatiales structurées qui associent des informations attributaires aux coordonnées géographiques.

### **2.6.2. Manipulation et Traitement des Données :**

Grâce aux fonctionnalités intégrées des logiciels SIG, il est possible de transformer, combiner et enrichir les données spatiales pour répondre à des besoins spécifiques d'analyse

Par exemple, une couche de données peut être superposée avec d'autres pour étudier les interactions entre différents phénomènes géographiques.

### **2.6.3. Analyse Spatiale :**

L'une des principales forces des SIG réside dans leur capacité à effectuer des analyses complexes sur les données spatiales. Cela inclut l'analyse de proximités, les calculs de distances, les modélisations de terrains, ou encore les études de tendances spatiales

Ces analyses aident à extraire des informations significatives qui ne seraient pas visibles à travers des cartes statiques traditionnelles.

### **2.6.4. Visualisation et Cartographie :**

Les SIG facilitent la création de cartes interactives et dynamiques qui rendent les données plus accessibles et compréhensibles. Cette visualisation peut inclure différentes couches d'information superposées pour montrer des relations entre plusieurs variables . Des exemples concrets incluent la planification urbaine, le suivi environnemental, ou encore la gestion des risques naturels.

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

### 2.6.5. Gestion Intégrée des Données :

En combinant des technologies cartographiques, statistiques et de base de données, les SIG permettent une gestion intégrée des données spatiales, favorisant ainsi une meilleure prise de décision, Ils soutiennent également la collaboration entre différents acteurs en partageant des informations géoréférencées via des plateformes numériques.

### 2.6.6. Les applications Pratiques :

Dans des domaines variés tels que l'aménagement du territoire, l'agriculture précise, la gestion des ressources naturelles, ou encore les infrastructures de transport, les SIG optimisent la gestion des données spatiales pour améliorer l'efficacité opérationnelle via la stratification de l'information géospatiales sous forme de couches d'information, chaque couche intègre les mêmes objets de même nature géométrique et physique. [51]

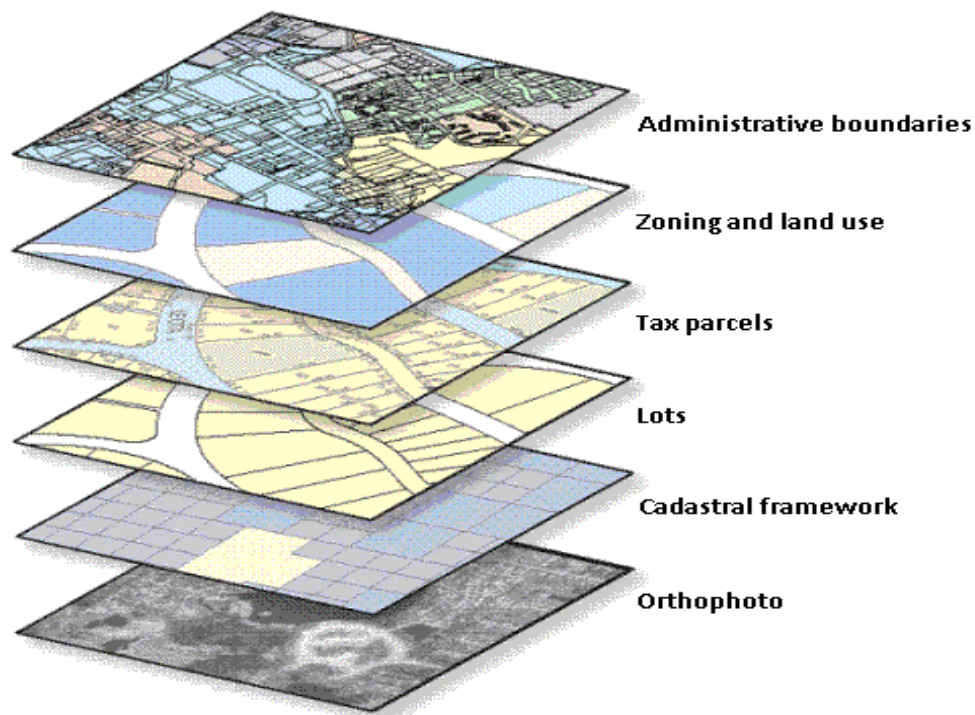


Figure 21 : Exemple de classification des objets géospatiales sous forme de couches d'information [45]

## Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données

### 2.7 Limites et défis liés à la collecte des données :

Les limites et défis liés à la collecte des données sont nombreux et peuvent affecter significativement la qualité, l'exactitude et l'utilité des informations recueillies. Voici quelques-uns des principaux défis :

#### 2.7.1. Accès aux données :

- **Zone géographique étendue** : Les nappes phréatiques couvrent souvent de vastes zones géographiques, et l'accès à certaines régions peut être difficile en raison de la nature éloignée, du terrain ou de restrictions politiques et économiques.
- **Accès aux puits de surveillance** : Les données sur les niveaux d'eau sont souvent collectées à partir de puits de surveillance, mais ces derniers peuvent être rares ou mal distribués. Cela rend difficile l'obtention de données représentatives pour toute la région.

#### 2.7.2. Variabilité temporelle :

- **Fluctuations saisonnières** : Les nappes phréatiques varient naturellement selon les saisons, influencées par les précipitations, l'évaporation et la consommation d'eau. Capturer des données sur de longues périodes est essentiel, mais cela nécessite des ressources et un suivi continu.
- **Changement climatique** : Les effets du changement climatique modifient les régimes pluviométriques, les périodes de sécheresse et les niveaux des nappes phréatiques, rendant l'adaptation des modèles plus complexe.

#### 2.7.3. Complexité des processus souterrains :

- **Hétérogénéité des aquifères** : Les aquifères souterrains sont souvent très complexes et hétérogènes, avec des propriétés variées comme la perméabilité et la porosité. La collecte de données détaillées sur ces propriétés dans chaque zone est coûteuse et difficile.
- **Interactions avec d'autres réservoirs d'eau** : Les nappes phréatiques sont influencées par les interactions avec les rivières, les lacs, et d'autres sources d'eau souterraine. Modéliser

## **Chapitre 02 : État de l'art sur les techniques de collecte des données**

Ces interactions nécessitent une compréhension approfondie de ces processus et des données supplémentaires .

### **2.7.4 Qualité des données :**

- **Inexactitude des mesures** : Les instruments utilisés pour mesurer les niveaux des nappes, comme les piézomètres ou les capteurs d'humidité, peuvent être affectés par des erreurs de calibration, des défauts techniques ou des obstructions.
- **Données disparates** : Les données collectées peuvent provenir de différentes sources, avec des protocoles de mesure variés, ce qui rend difficile la comparaison directe entre différentes séries de données.
- **Manque de données historiques** : Dans certaines régions, les données sur les nappes phréatiques peuvent être insuffisantes ou inexistantes, rendant la modélisation et l'analyse des tendances à long terme difficiles.

### **2.7.5 Interprétation et modélisation des données :**

- **Complexité de la modélisation** : Les modèles de nappes phréatiques, en particulier ceux basés sur des phénomènes naturels complexes, nécessitent une interprétation avancée des données, et des erreurs de modélisation peuvent surgir en raison de la mauvaise qualité des données d'entrée.
- **Prédiction des événements extrêmes** : La modélisation des nappes phréatiques doit aussi prendre en compte des événements extrêmes, comme les sécheresses ou les crues, ce qui reste un défi lorsque les données historiques sont insuffisantes pour bien comprendre de tels phénomènes.

## **2.8 Conclusion :**

En conclusion, La collecte de données constitue une étape essentielle pour l'analyse et la modélisation des nappes aquifères. Les techniques modernes, telles que les SIG, les mesures GPS et les études géophysiques, permettent d'obtenir des informations précises. Toutefois, des limites persistent, notamment en termes d'accès, de qualité et de coûts, ce qui souligne l'importance d'une gestion rigoureuse et intégrée des données.

CHAPITRE 03 : ÉTAT DE  
L'ART SUR LES TECHNIQUES  
DE TRAITEMENT ET DE  
VISUALISATION

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.1 .Introduction :**

La modélisation tridimensionnelle des nappes aquifères constitue un outil fondamental pour la compréhension du fonctionnement hydrodynamique des systèmes souterrains. Elle permet non seulement de visualiser les structures géologiques et hydrogéologiques en 3D, mais aussi de simuler les écoulements souterrains et d'évaluer les impacts de diverses actions anthropiques ou climatiques.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes techniques et outils utilisés pour le traitement et la visualisation des données hydrogéologiques, en mettant l'accent sur les logiciels spécialisés dans la modélisation des nappes. Il décrit également la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude, depuis la collecte et l'intégration des données jusqu'à la construction du modèle 3D et l'analyse des résultats.

Enfin, une étude de cas est présentée afin d'illustrer l'application concrète de ces approches sur une région donnée. Elle permet de mettre en évidence les apports de la modélisation 3D dans la gestion et la compréhension des ressources en eau souterraines.

### **3.2 . Techniques de visualisation en 3D :**

La visualisation 3D est le processus de représentation graphique d'un objet ou d'un phénomène dans un espace tridimensionnel , Qui nous permet de voir comment les couches géologiques, les niveaux d'eau, les puits et même les écoulements d'eau souterraine sont répartis dans l'espace, de manière réaliste et intuitive.

#### **3.2.1 Maillages volumétrique :**

Il représente le volume sous-sol découpé en cellule 3D , Chaque cellule contient des valeurs comme la perméabilité , la charge hydraulique .

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.2.2 ISO surface et surface équipotentielle :**

Représente des zones de la même charge hydraulique , permet de faciliter l'analyse et le calcul du gradient hydraulique .

### **3.3.3 Visualisation du flux :**

Représente une utilisation de flèches ou lignes de courant pour montrer les directions et vitesses d'écoulement souterrain , Elle est pratique pour interpréter les résultats d'un modèle MODFLOW.

### **3.3.4 Coupes transversales :**

Visualisent les couches géologiques et les niveaux d'eau dans le but de comprendre la structure verticale du sous-sol. [51]

## **3.3 Interpolation des données :**

Est une méthode mathématique utilisée en hydrogéologie pour estimer les valeurs d'une variable continue comme le niveau piézométrique, perméabilité , en des points non mesurés à partir d'un ensemble de points connus. Elle permet ainsi de générer des cartes de répartition spatiale ou des surfaces continues à partir de données discrètes souvent collectées à partir de forages, piézomètres . [52]

Dans notre thème la modélisation 3D des nappes aquifères, l'interpolation joue un rôle principal dans l'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique pour :

- Reformuler la géométrie des couches géologiques .
- Créer des surfaces piézométriques .
- Distribuer des propriétés hydrodynamiques :perméabilité, conductivité hydraulique.

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.3.1 Les méthodes d'interpolation des données :**

#### **3.1.1.1 La méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW) :**

Est une méthode d'interpolation déterministe qui attribue un poids aux valeurs mesurées en fonction de leur distance par rapport au point à estimer. Les points les plus proches ont un poids plus élevé, influençant ainsi davantage la valeur estimée. Cette méthode repose uniquement sur les valeurs des points voisins, sans tenir compte de la structure spatiale ou des relations statistiques entre les points . [53]

#### **3.1.1.2. Le krigeage :**

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique qui repose sur un modèle statistique prenant en compte l'autocorrélation des données, c'est-à-dire la relation spatiale entre les points mesurés. Contrairement aux méthodes déterministes, le Krigeage permet non seulement de générer une surface prédictive, mais aussi d'estimer l'incertitude ou la précision des prévisions. Il est particulièrement utile lorsqu'il existe une corrélation spatiale, où la distance ou la direction entre les points influencent la variation de la surface. Le processus de Krigeage inclut plusieurs étapes : l'analyse statistique exploratoire des données, la modélisation du Vario gramme, la création de la surface et, en option, l'exploration d'une surface de variance. Cette méthode est couramment utilisée en géologie et en sciences du sol . [52]

#### **3.1.1.3 La méthode Spline :**

La méthode spline est une technique d'interpolation déterministe qui génère une surface lisse passant exactement par les points mesurés. Elle repose sur des formules mathématiques qui définissent la courbure de la surface, assurant une transition fluide entre les points. Bien qu'elle produise des surfaces visuellement agréables, elle peut parfois conduire à des résultats irréalistes si les données présentent des variations importantes. [54]

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.1.1.4 La méthode linéaire :**

La méthode linéaire est simple et rapide, mais peu précise pour les données complexes. [53].

### **3.4. Représentation des couches géologique et piézométriques :**

La représentation des couches géologiques et des niveaux piézométriques constitue une phase essentielle dans la compréhension de la structure et du fonctionnement d'un aquifère. Elle permet de visualiser la disposition spatiale des formations géologiques, ainsi que la dynamique de l'eau souterraine.

#### **3.4.1 Les étapes de la représentation :**

##### **► Collecte des données :**

- Données géologiques issues de coupes, sondages, forages, cartes géologiques [54]
- Données piézométriques provenant de campagnes de mesure, de bases de données hydrogéologiques, ou d'observations sur le terrain. [55] .

##### **► Traitement des données :**

- Géoréférencement et intégration des données dans un système d'information géographique SIG ou dans un logiciel de modélisation 3D comme le Modflow et le GMS
- Correction des données altimétriques pour homogénéiser les niveaux par rapport au niveau de la mer .
- Interpolation des niveaux piézométriques comme le krigeage, IDW pour obtenir des courbes de niveau. [56] .

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **► Construction des couches géologiques :**

- Élaboration de coupes verticales le long de profils stratégiques en fonction des forages et de la topographie.
- Identification et différenciation des formations géologiques perméables et imperméables.
- Représentation des limites de l'aquifère. [57]

### **► Élaboration de la carte piézométrique :**

- Tracé des lignes piézométriques à partir des données de niveau d'eau mesuré dans les forages
- Mise en évidence des directions d'écoulement (perpendiculaires aux lignes piézométriques)
- Localisation des zones de recharge et de décharge potentielles. [58]

### **► Interprétation :**

- Analyse des interactions entre les couches géologiques et les écoulements .
- Identification de barrières potentielles à l'écoulement par exemple : failles, couches argileuses .
- Évaluation des gradients hydrauliques et implications pour l'exploitation de la nappe . [59]

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

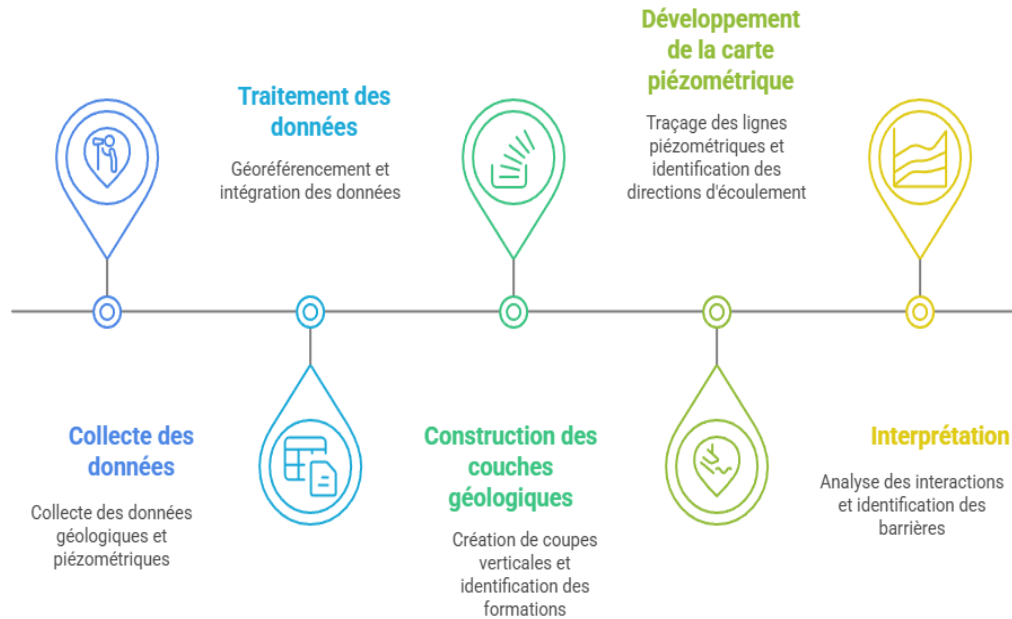


Figure 22:Etapes pour représentation des couches géologiques et piézométriques

La modélisation des nappes aquifères repose sur l'utilisation de logiciels spécialisés permettant de simuler leur comportement hydrodynamique .Cette étude présente les principaux outils disponibles et leurs applications comme Voxler , Modflow , GMS dans la gestion des ressources en eau souterraines .

### **3.5 . Outils logiciels pour la modélisation des nappes aquifères :**

#### **3.5.1 VOXLER :**

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.5.1.1 Présentation de Voxler :**

Voxler est un logiciel de visualisation 3D développé par Golden Software, utilisé en hydrogéologie pour représenter les nappes aquifères de manière claire et détaillée. Il permet d'interpoler des données de forage (comme les niveaux piézométriques) afin de créer des modèles volumétriques. Grâce à des outils comme la génération d'iso surfaces et de coupes, il facilite l'analyse de la structure interne des aquifères et l'identification de zones critiques (recharge, pollution), Bien que Voxler soit avant tout un outil de visualisation sans capacité de simulation d'écoulement il est très efficace pour comprendre, présenter et interpréter les systèmes hydrogéologiques complexes. L'utilisation de Voxler dans la modélisation des nappes aquifères présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il offre une visualisation rapide et intuitive des structures souterraines, ce qui facilite l'interprétation des données, même complexes. Ensuite, le logiciel permet de mettre en évidence certaines zones critiques, comme les secteurs de recharge, de décharge ou les anomalies potentielles liées à la pollution ou à la surexploitation. De plus, la qualité graphique des rendus générés par Voxler est particulièrement utile pour la communication scientifique, que ce soit dans des rapports, des présentations ou des publications. On présente ci-dessous son interface . [46]

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

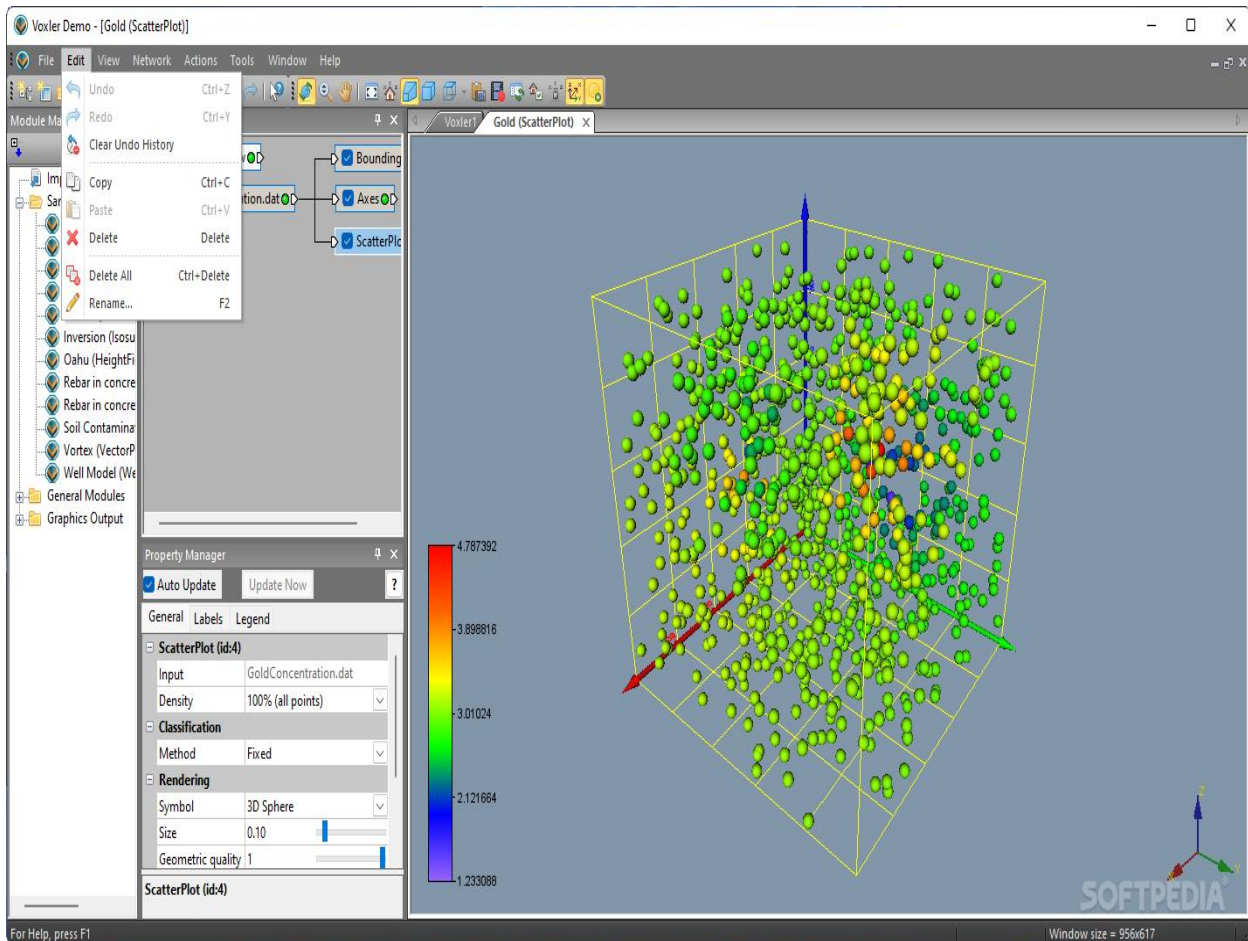


Figure 23 : Interface du logiciel Voxler v4 [46]

### 3.5.1.2 Processus de traitement des données dans voxler :

Dans Voxler, le traitement des données suit un processus structuré permettant de passer de simples points de mesure à des visualisations 3D avancées. Tout commence par l'importation des données à partir de fichiers compatibles. Ensuite, les données sont préparées et filtrées pour corriger d'éventuelles anomalies. Après cette étape, on procède à l'interpolation en créant une grille 3D régulière à partir des données dispersées. Une fois la grille générée, différentes méthodes de visualisation sont utilisées pour représenter les résultats (volumes, iso surfaces, Stream lignes, etc.). Finalement, le projet peut être personnalisé (ajustement des couleurs, échelles, axes) et exporté

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

sous forme d'images ou de fichiers pour diffusion ou analyse supplémentaire. L'organigramme suivant illustre ce processus . [63]



Figure 24 :Processus de traitement dans Voxler

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

### 3.5.1.3 Technique de visualisation 3D utilisée par Voxler :

VOXLER est un logiciel de visualisation scientifique 3D développé par Golden Software. Il utilise principalement des techniques avancées de représentation tridimensionnelle pour explorer et analyser les données souterraines. Parmi ses méthodes de visualisation les plus courantes, on retrouve les iso surfaces, qui permettent de représenter des volumes 3D montrant des zones de même valeur. Le logiciel offre également la possibilité de créer des coupes transversales, utiles pour visualiser la structure interne du sous-sol. Grâce au rendu volumique (volumetric rendering), VOXLER fournit une représentation visuelle réaliste des données spatiales en trois dimensions. En outre, il peut afficher des vecteurs 3D pour représenter la direction et l'intensité des flux, à condition que les données correspondantes soient disponibles. [60]

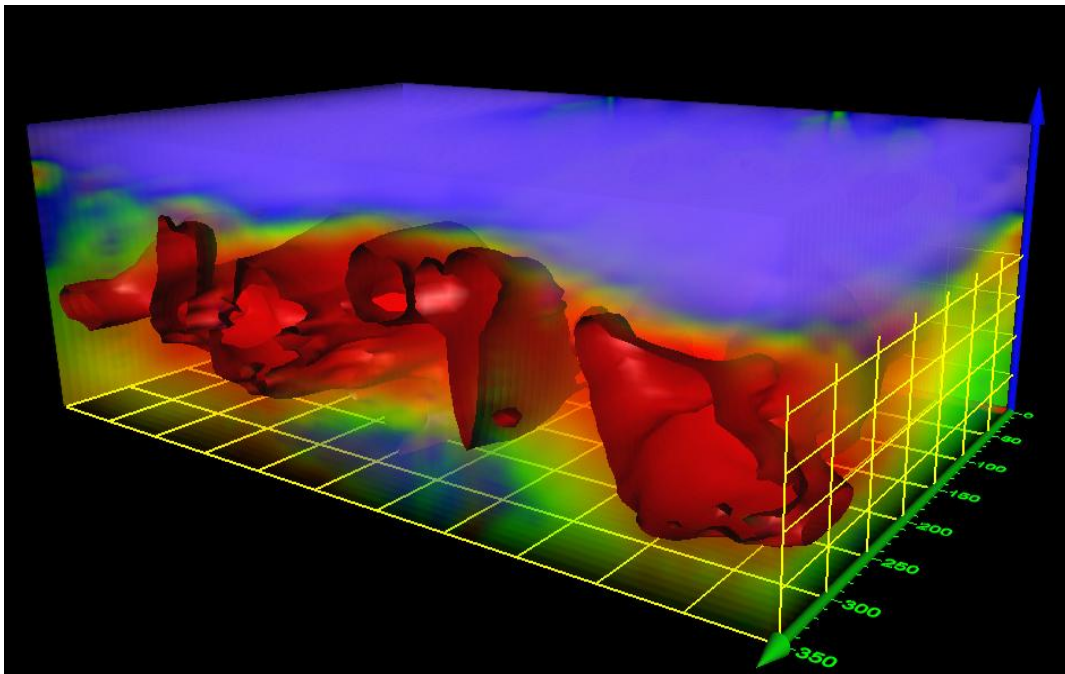


Figure 25 : Visualisation 3D des volumes d'eau souterraines sur Voxler à partir d'un champ scalaire

### 3.5.1.4 Interpolation des données dans Voxler :

Dans Voxler, l'interpolation est une étape essentielle pour transformer des données ponctuelles issues de mesures de terrain (forages, piézomètres) en surfaces ou volumes continus exploitables

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

pour la modélisation 3D. Le logiciel propose plusieurs méthodes d'interpolation adaptées aux différents types de données et objectifs. L'Inverse Distance Weighting (IDW) est l'une des méthodes principales, attribuant aux points voisins une influence inversement proportionnelle à leur distance, ce qui produit des surfaces lisses convenant à des jeux de données bien répartis. Le krigeage est également disponible, permettant de prendre en compte la structure spatiale des données pour obtenir une interpolation plus précise et d'estimer l'incertitude associée. Voxler propose aussi la méthode du Natural Neighbor, qui respecte les variations locales sans générer d'extrapolations exagérées, ainsi que l'interpolation par courbure minimale (Minimum Curvature), qui génère des surfaces douces similaires à des effets spline, sans être une véritable spline mathématique. Ces méthodes permettent aux utilisateurs de construire des volumes interpolés fiables, facilitant la visualisation 3D des niveaux d'eau, des concentrations de contaminants ou des propriétés hydrogéologiques . [60]

### **3.5.1.5 Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec VOXLER :**

Le logiciel Voxler, développé par Golden Software, permet de modéliser en trois dimensions des nappes aquifères à partir de données de terrain, en particulier les coordonnées spatiales (X, Y, Z) et les niveaux piézométriques. Pour estimer le volume d'une nappe aquifère, il est nécessaire d'interpoler les données ponctuelles à l'aide du module Gridder afin de générer une grille 3D représentant le champ piézométrique. Ensuite, des objets visuels tels que *Iso surface* ou *Volume Render* peuvent être utilisés pour représenter la surface supérieure et la base de l'aquifère. Le volume de la nappe est ensuite estimé soit directement dans Voxler via des iso surfaces, soit par exportation de la grille interpolée, suivie d'un calcul externe à l'aide de logiciels comme Surfer, ArcGIS ou un langage de programmation scientifique tel que Python. Ce processus repose sur l'intégration volumique entre deux surfaces (supérieure et inférieure) dans un modèle 3D interpolé. Il est à noter que Voxler est avant tout un outil de visualisation scientifique, et que l'estimation du volume doit être conduite avec rigueur méthodologique, en particulier dans le choix de la méthode d'interpolation, la définition des mailles et le traitement des données [66]

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

### 3.5.1.6 Essai de modélisation sous Voxler :

#### Essai N°01 :

Pour le premier essai nous avons élaborer la visualisation 3D par introduction de la distance, La profondeur et la pression

	A	B	C	D
1	0	300	1150.1	450.51
2	25	300	1150.15	340.745
3	75	300	1150.25	194.93125
4	125	300	1150.35625	510.4925
5	175	300	1150.46875	275.3275
6	225	300	1150.59375	338.3075
7	275	300	1150.73125	271.5875
8	325	300	1150.88125	313.0625
9	375	300	1151.04375	250.355
10	425	300	1151.225	288.77
11	475	300	1151.425	233.09775
12	525	300	1151.65625	330.3775
13	575	300	1151.91875	267.69
14	625	300	1152.2125	284.465
15	675	300	1152.5375	278.445
16	725	300	1152.89375	273.045
17	775	300	1153.28125	252.06
18	825	300	1153.7125	290.8375
19	875	300	1154.1875	229.9595
20	925	300	1154.70625	332.645
21	975	300	1155.26875	251.8275
22	1025	300	1155.8875	332.37
23	1075	300	1156.5625	506.3175
24	1125	300	1157.29375	172.8695
25	1175	300	1158.08125	535.985
26	1225	300	1158.93125	162.53825
27	1275	300	1159.84375	227.79725
28	1325	300	1160.8125	316.025
29	1375	300	1161.8375	269.85
30	1425	300	1162.91875	268.445
31	1475	300	1164.05625	214.1535
32	1525	300	1165.23125	354.005
33	1575	300	1166.44375	267.0775
34	1625	300	1167.68125	283.7625
35	1675	300	1168.94375	214.69925
36	1725	300	1170.2375	398.5375
37	1775	300	1171.5625	294.14
38	1825	300	1172.9	300.91
39	1875	300	1174.25	301.1175
40	1925	300	1175.6	299.5425

Tableau 4 : Le profil de résistivité électrique le long d'une ligne de mesure (Y = 300). Sur l'axe horizontal X

Le tableau fourni représenter des données géospatiales structurées en 4 colonnes :

**Colonne A :** Une variable numérique croissante (de 0 à 1925, par pas de 50) , qui représente distance horizontale d'un profil de forage .

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

**Colonne B :** Valeur constante **300** dans tous les cas cela correspond à une pression .

**Colonne C:** Valeurs croissant de **1150.1** à **1175.6** avec une progression non linéaire. Cela représente une profondeur de forage en mètre en  $\Omega \cdot m$

**Colonne D :** Valeurs variables (entre  $\sim 160$  et  $\sim 535$ ) c'est la résistivité électrique du sol .

### **Explication :**

- **A  $\leftrightarrow$  C :** La colonne C augmente avec A, suggérant une corrélation positive : plus on avance en X plus la profondeur Z augmente.
- **A  $\leftrightarrow$  D:** La colonne D montre des fluctuations (ex : pics à 510.49, 535.98 creux à 160). Cela pourrait indiquer des hétérogénéités dans le milieu étudié.
- **C constants :** Indique que les données sont unidimensionnelles

### **► Visualisation des données par apport notre exemple précédent :**

#### **Nuage de points 3D :**

- **X** = Colonne A , **Y** = Colonne B , **Z** = Colonne C.
- **Couleur** = Colonne D (pour visualiser les variations).
- **Résultat :** Une représentation 3D montrant les variations spatiales de D.

Ci-dessous , les résultats de la modélisation 3D effectué sous Voxler d'après les données représenté précédemment :

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

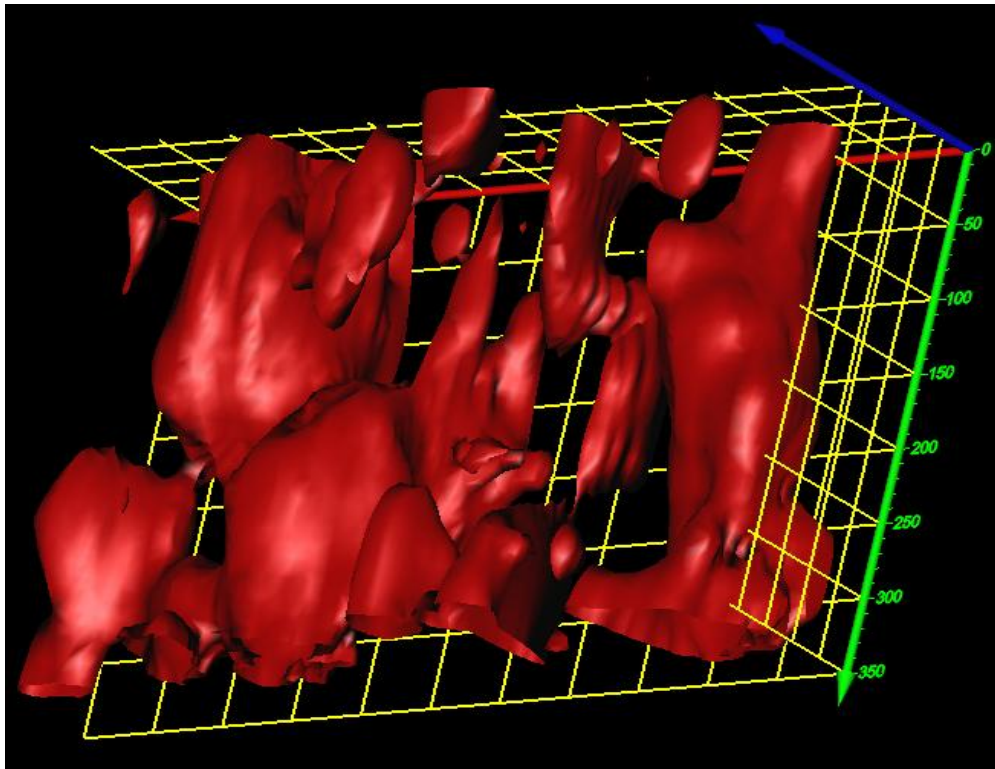
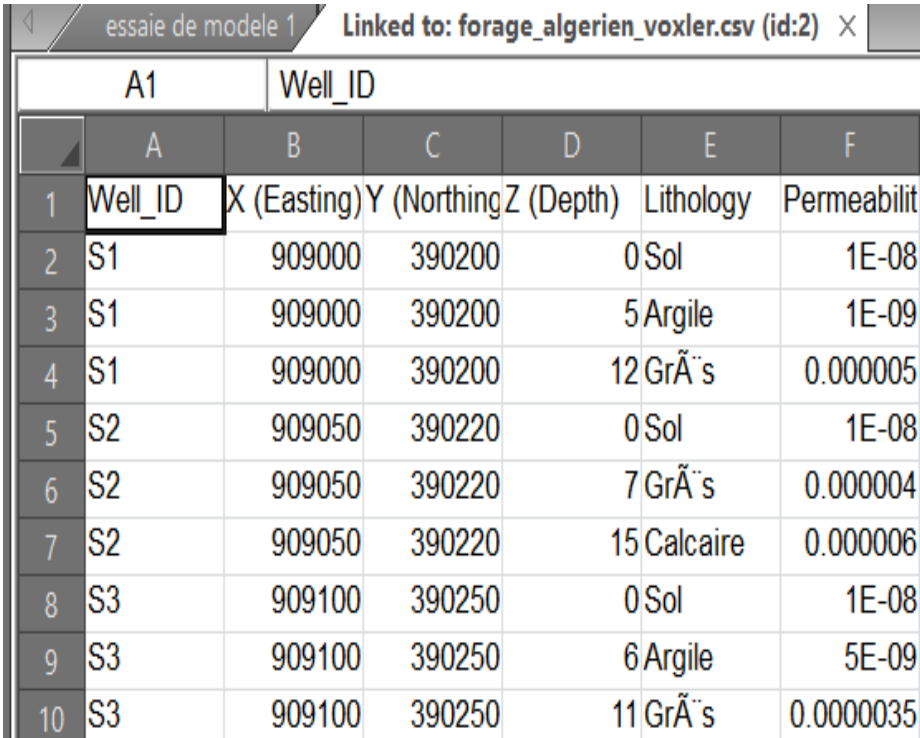


Figure 26 : Représentation 3D montrant les variations spatiales

### **Essai N°02 :**

Pour le deuxième essai , nous avons utilisé des données différentes, il s'agit de coordonnées superficielles et la profondeur, la lithologie et la perméabilité du sol.

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation



	A1	Well_ID				
	A	B	C	D	E	F
1	Well_ID	X (Easting)	Y (Northing)	Z (Depth)	Lithology	Permeability
2	S1	909000	390200	0	Sol	1E-08
3	S1	909000	390200	5	Argile	1E-09
4	S1	909000	390200	12	Grès	0.000005
5	S2	909050	390220	0	Sol	1E-08
6	S2	909050	390220	7	Grès	0.000004
7	S2	909050	390220	15	Calcaire	0.000006
8	S3	909100	390250	0	Sol	1E-08
9	S3	909100	390250	6	Argile	5E-09
10	S3	909100	390250	11	Grès	0.0000035

Tableau 5: les données d'un forage Algérien à Oran

### ► Étapes d'importation et d'affectation des colonnes dans Voxler :

#### 1. Importation des données de forage :

Un fichier de données au format Excel a été créé, contenant les informations suivantes :

- Coordonnées X (Easting)
- Coordonnées Y (Northing)
- Profondeur Z (Depth)
- Type de roche (Lithologie)
- Coefficient de perméabilité (Permeability)

Le fichier a été converti en format CSV pour le rendre compatible avec le logiciel **Voxler**.

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

### 2. Attribution des colonnes (Assign Columns) :

Après l'importation du fichier, les colonnes ont été définies selon le type de données comme suit :

Type de donnée	Colonne attribuée
<b>X (coordonnée est)</b>	X (Easting)
<b>Y (coordonnée nord)</b>	Y (Northing)
<b>Z (profondeur)</b>	Z (Depth)
<b>Valeur étudiée</b>	Lithologie ou Perméabilité

Tableau 6 : Attribution des colonnes

### 3. Visualisation des données en trois dimensions :

Après l'assignation des colonnes, les données ont été représentées en 3D. Chaque forage est affiché selon sa profondeur réelle, avec des dégradés de couleurs représentant le type de roche ou la valeur de la perméabilité.

### 4 . Représentation selon la lithologie ou la perméabilité :

**La lithologie :** Les couches apparaîtront colorées selon le type de roche. On peut modifier les couleurs depuis la fenêtre Property Manager.

**La Perméabilité :** Le dégradé de couleurs s'affichera selon les valeurs de perméabilité .

### 5 . Création d'un maillage tridimensionnel (Volume 3D) :

Pour la transformation des points en un modèle volumique , On a fait un clic droit sur la source dans le Network Manager (Gridder) .

Après avoir aussi les icônes : VolumeRender et Iso surface , Cela générera une représentation 3D des couches ou des valeurs à l'aide de couleurs ou de surfaces.

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

### 6. Ajout de coupes ou tranches (Slice) :

Pour voir l'intérieur du modèle depuis VolumeRender, il faut sélectionner le Slice après le Graphics output .

Le plan (X, Y ou Z) définit une tranche apparaîtra pour découper le modèle et révéler les couches internes.

### 7. Sauvegarde et exportation :

Pour sauvegarder le projet, il suffit de cliquer sur File, puis sur Save. Si l'on souhaite exporter une image du modèle, il faut aller dans File, puis sélectionner Export. Ces options permettent de conserver le projet et de partager facilement une représentation visuelle du modèle.

#### 3.5.1.7 Résultats : Modèle obtenus :

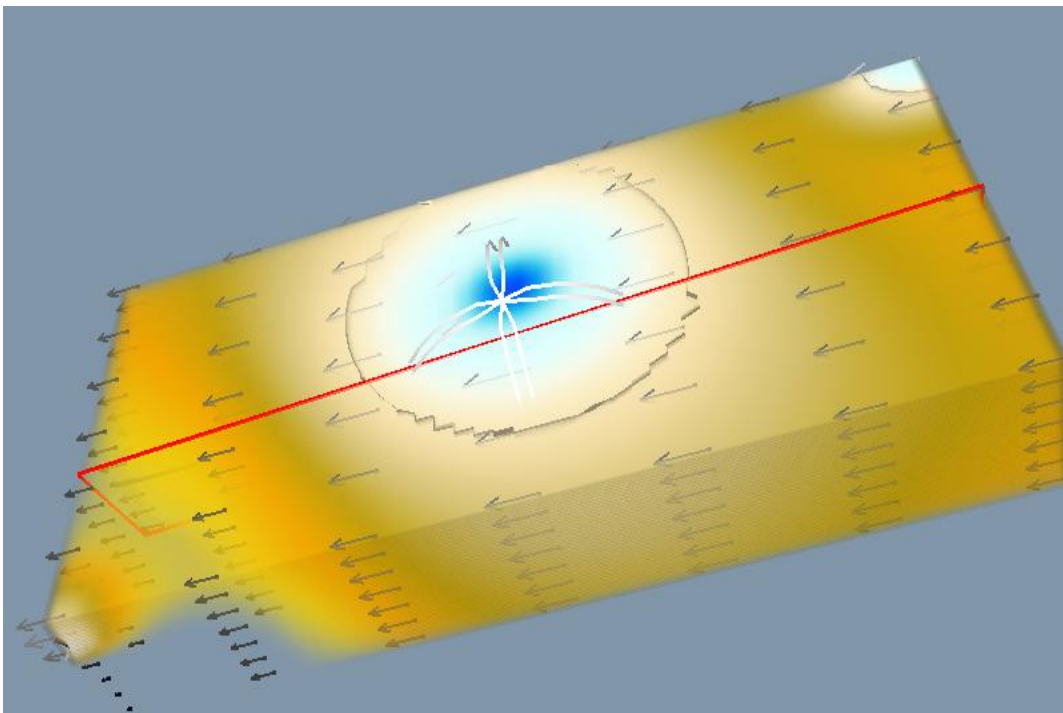


Figure 27:Modélisation 3D de la perméabilité des sous-sols à partir des données de forage Algérien

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **Observation :**

Les couleurs dans notre modèle représentent la perméabilité :

- ✓ Bleu = zones à faible perméabilité comme l'argile.
- ✓ Rouge et jaune = zones à haute perméabilité comme le grès .

Les flèches représentent le mouvement des eaux souterraines :

- ✓ Plus la flèche est longue, plus le débit est fort .

On constate que l'écoulement se dirige vers les zones à perméabilité plus élevée .

### **3.6.1 MODFLOW :**

#### **3.6.1.1 Présentation de MODFLOW :**

MODFLOW est un programme de modélisation de l'écoulement des eaux souterraines développé par l'USGS (United States Geological Survey). Il repose sur la méthode numérique des différences finies pour simuler les écoulements dans les aquifères. Le domaine de modélisation est discrétisé en un maillage structuré composé de lignes, de colonnes et de couches, formant ainsi un réseau de cellules (ou mailles) de représenter la distribution des propriétés hydrogéologiques et des conditions aux limites comme est montré dans la Figure ci-dessous .

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

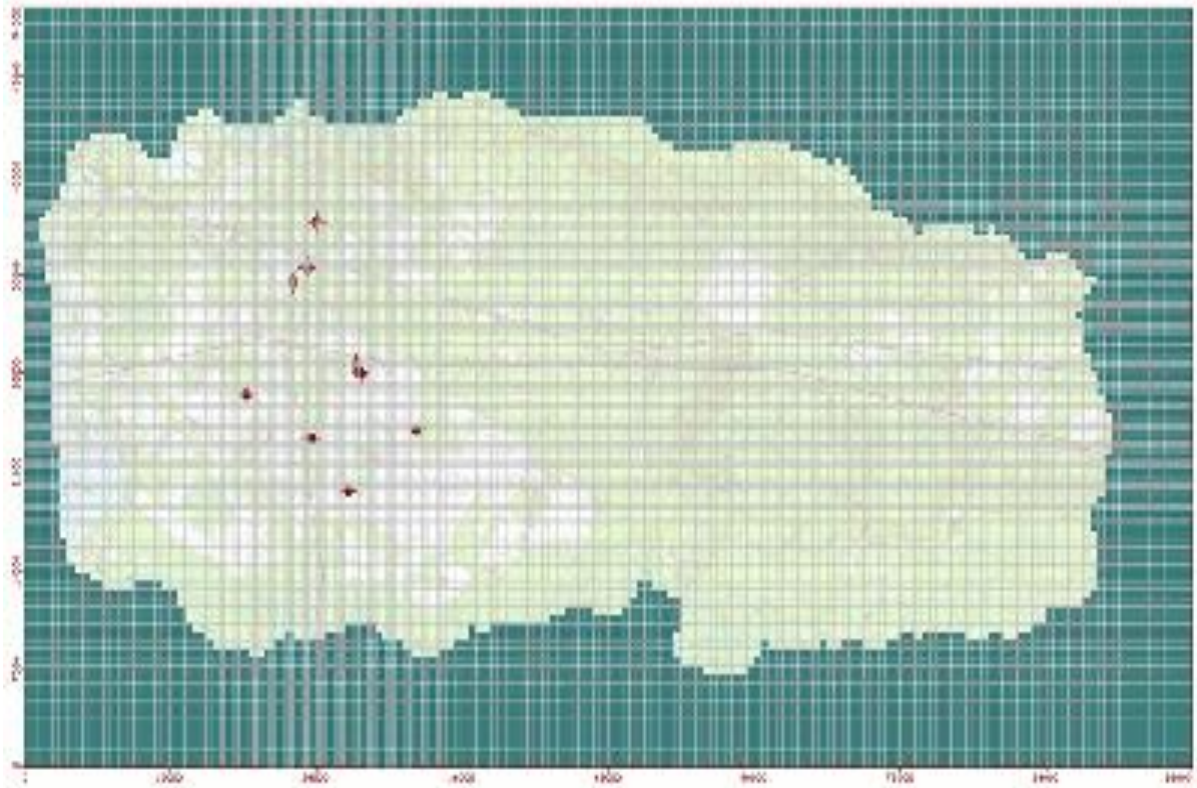


Figure 28 : Vue par couches des cellules de la grille à différences finies du modèle MODFLOW [47]

Dans chaque cellule du modèle, l'utilisateur assigne des propriétés hydrauliques (conductivité, stockage, etc.) ainsi que les conditions aux limites appropriées (recharge, puits, rivières, etc.). MODFLOW utilise ensuite ces données pour établir un système d'équations aux différences finies, qu'il résout afin de déterminer la charge hydraulique au centre de chaque cellule. Ce calcul permet de simuler les écoulements souterrains dans le domaine étudié de manière réaliste et cohérente. [47] .

### **3.6.1.2 Le processus de traitement des données dans MODFLOW :**

Le processus de traitement des données dans MODFLOW suit une méthodologie rigoureuse pour simuler les écoulements souterrains. Il commence par la préparation des données d'entrée, incluant les paramètres hydrogéologiques (conductivité hydraulique, porosité), les conditions aux limites (rivières, puits) et la géométrie du domaine d'étude. Ces données sont ensuite discrétisées dans un maillage 3D, où chaque cellule reçoit ses valeurs attributaires. L'étape cruciale de calibration

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

permet d'ajuster les paramètres pour reproduire les observations piézométriques, souvent à l'aide d'outils comme PEST. Une fois validé, le modèle exécute des simulations temporelles (transitoire) ou statiques (permanent), générant des résultats qui seront visualisés et analysés à travers des cartes de charge hydraulique, des bilans de masse ou des trajectoires de particules. Ce processus itératif, combinant interprétation géologique et analyse numérique, garantit la fiabilité des prévisions hydrogéologiques . [67]

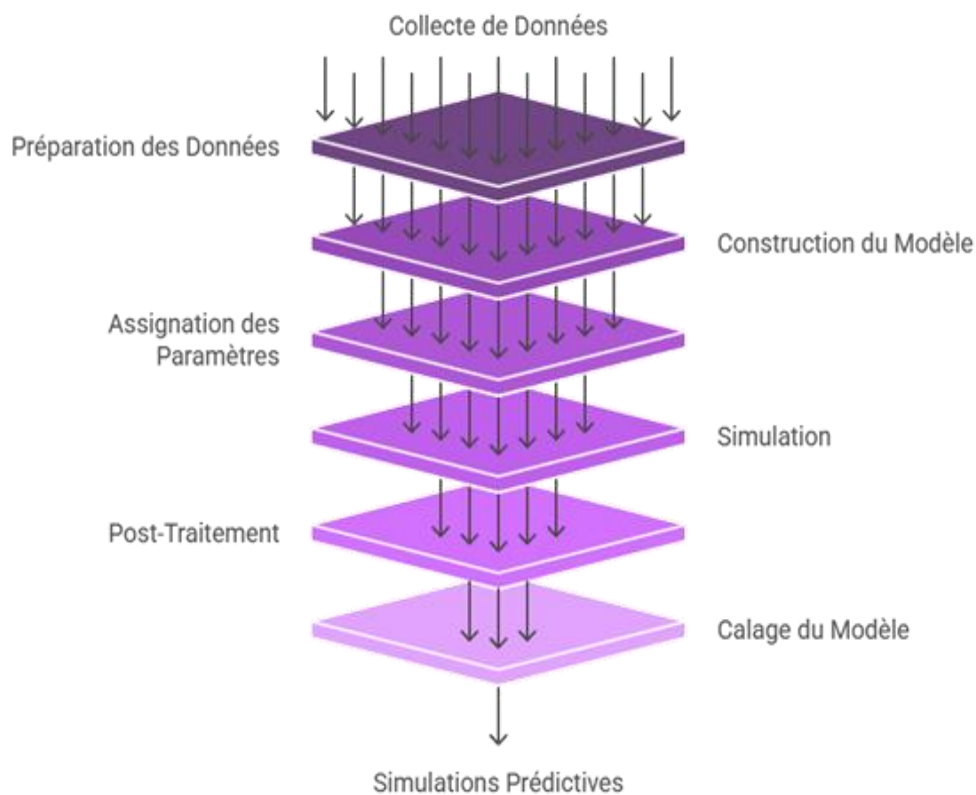


Figure 29 : Processus de traitement des données dans MODFLOW

### **3.6.1.3 Techniques de visualisation utilisées par MODFLOW :**

Le logiciel MODFLOW, développé par l'USGS, est un moteur de simulation hydrogéologique largement utilisé pour modéliser l'écoulement souterrain. Il ne propose aucune visualisation directe, car il fonctionne principalement en ligne de commande (console). MODFLOW repose sur

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

un maillage volumétrique structuré, généralement une grille 3D, pour représenter le sous-sol et simuler le déplacement de l'eau souterraine à travers les différentes couches. Toutefois, le logiciel ne génère pas de visualisations graphiques par lui-même. Pour interpréter les résultats produits (comme les charges hydrauliques ou les débits), il est nécessaire d'utiliser des interfaces graphiques externes telles que GMS, Model Muse, ou Visual MODFLOW, qui permettent d'afficher les maillages, les iso surfaces, les vecteurs d'écoulement et d'autres résultats de manière visuelle . [68]

### **3.6.1.4 Interpolation des données dans MODFLOW :**

L'interpolation des données constitue une étape fondamentale dans la mise en place d'un modèle hydrogéologique avec MODFLOW, car elle permet de transformer des données ponctuelles (comme la conductivité hydraulique ou la recharge) en champs paramétriques continus nécessaires aux calculs de simulation. Plusieurs méthodes d'interpolation sont utilisées selon la nature des données disponibles et le niveau de précision requis. Le krigeage, méthode géostatistique, est particulièrement adapté aux propriétés présentant une corrélation spatiale, tandis que des méthodes déterministes telles que l'inverse de la distance pondérée (IDW) ou les splines sont privilégiées pour des estimations plus simples et rapides. Des approches hybrides combinant les données issues de la géologie et des mesures in situ permettent également d'affiner les interpolations. Ces opérations sont généralement effectuées en prétraitement, à l'aide de logiciels ou bibliothèques spécialisés comme GMS ou Flopy (en Python), avant d'intégrer les données dans les packages de MODFLOW tels que LPF (Layer Property Flow) ou RCH (Recharge). La qualité de l'interpolation influe directement sur la fiabilité des résultats du modèle, ce qui nécessite souvent une analyse de sensibilité pour évaluer l'impact des hypothèses spatiales sur la simulation. [69]

### **3.6.1.5 Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec MODFLOW :**

MODFLOW, permet de calculer le volume d'eau dans un aquifère en intégrant les paramètres géométriques et hydrogéologiques du système aquifère. Pour ce faire, le modèle divise l'aquifère en une série de cellules tridimensionnelles (grille), chacune représentant un volume d'eau. Le volume d'eau souterraine dans un aquifère est calculé en intégrant l'épaisseur de la zone saturée sur chaque cellule de la grille, en tenant compte des propriétés de stockage et de perméabilité de

### **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

l'aquifère. Ainsi, le volume total d'eau souterraine dans l'aquifère est donné par la somme des volumes d'eau dans toutes les cellules du modèle. Cette estimation peut être influencée par des paramètres tels que les conditions aux limites, les variations spatiales de la recharge et les prélèvements d'eau. Le calcul de ce volume dépend également de la résolution du modèle, la précision des données d'entrée et les conditions de simulation choisies . [51]

Le volume d'eau (V) dans chaque cellule de la grille peut être estimé par la formule suivante :

$$V=A \times H \times \phi$$

Où :

- ▶ A est la surface de la cellule de la grille (longueur x largeur)
- ▶ H est l'épaisseur de l'aquifère (profondeur de la nappe phréatique)
- ▶  $\Phi$  : est la porosité de l'aquifère

Volume de flux d'eau entrant ou sortant : MODFLOW peut aussi calculer les volumes d'eau entrant ou sortant d'une zone donnée en fonction des conditions aux limites, comme les puits, les flux de recharge, ou les pertes par évaporation. Cela peut être utile pour évaluer l'impact des activités humaines, comme l'irrigation ou les prélèvements, sur le volume d'eau disponible.

Calcul de la variation du volume au cours du temps : Si vous avez une simulation qui dure plusieurs étapes de temps, MODFLOW peut fournir les variations du volume d'eau dans l'aquifère à chaque étape, ce qui permet d'analyser les fluctuations du stock d'eau souterraine au fil du temps.

Exemple de calcul :

Si nous avons à titre d'exemple un aquifère de 1000 m<sup>2</sup> de surface, une hauteur de nappe de 10 m et une porosité de 0,3 le volume initial d'eau dans l'aquifère serait :

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

$$V=1000\text{m}^2 \times 10\text{m} \times 0,3=3000\text{m}^3$$

Cela représente le volume d'eau disponible dans cette zone de l'aquifère à un instant donné.

En résumé, MODFLOW peut effectivement être utilisé pour calculer et suivre le volume d'eau dans un aquifère, en fonction des paramètres géologiques et des conditions hydrologiques simulées.

### **3.6.1.6 Exemple numérique d'études avec MODFLOW :**

Ce modèle a pour objectif d'étudier l'écoulement des eaux souterraines à l'aide du suivi inverse des particules dans l'environnement MODFLOW 6, au sein d'un système hydrogéologique comportant un puits de pompage, une rivière et une zone de recharge naturelle. Une grille non structurée, avec un raffinement quadratique, a été utilisée afin d'améliorer la précision autour du puits, là où les gradients hydrauliques sont les plus élevés.

L'écoulement est simulé en régime permanent, et les trajectoires des particules sont calculées de manière rétrograde à partir des débits intercellulaires extraits du fichier de budget généré par le modèle d'écoulement (GWF). Cette approche permet de retracer les chemins que parcourt l'eau avant d'atteindre le puits, qu'elle provienne de la rivière ou de la zone de recharge, afin de mieux identifier les sources d'alimentation de la nappe.

Le modèle repose sur une structure en trois couches et intègre les propriétés hydrauliques spécifiques à chaque niveau, les caractéristiques du puits (débit de pompage), ainsi que les paramètres liés à la rivière (niveau, fond, conductance). Ces éléments permettent de mieux comprendre la dynamique du système aquifère sous l'effet du pompage, et d'évaluer la contribution relative de la recharge et de la rivière à l'alimentation du puits.

### Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre de périodes temporelles</b>	1
<b>Nombre de couches (dans la grille de base)</b>	3
<b>Nombre de lignes (dans la grille de base)</b>	21
<b>Nombre de colonnes (dans la grille de base)</b>	20
<b>Largeur de colonne (pieds)</b>	500.0
<b>Largeur de ligne (pieds)</b>	500.0
<b>Altitude du sommet du modèle (pieds)</b>	400.0
<b>Altitudes du fond des couches (pieds)</b>	220.0, 200.0, 0.0
<b>Porosité du sol (sans unité)</b>	0.1
<b>Taux de recharge (pieds/jour)</b>	0.005
<b>Conductivité hydraulique horizontale (pieds/jour)</b>	50.0, 0.01, 200.0
<b>Conductivité hydraulique verticale (pieds/jour)</b>	10.0, 0.01, 20.0
<b>Débit de pompage du puits (pieds<sup>3</sup>/jour)</b>	-150000.0
<b>Niveau de la rivière (pieds)</b>	320.0
<b>Fond de la rivière (pieds)</b>	317.0
<b>Conductance de la rivière (pieds<sup>2</sup>/jour)</b>	1.0e5

Tableau 7 : Les paramètres hydrauliques et structuraux du modèle de suivi de particules dans MODFLOW 6

### Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

Dans cet exemple, le modèle de suivi des particules (PRT) sous MODFLOW 6 est exécuté dans une simulation distincte de celle du modèle d'écoulement des eaux souterraines (GWF). Les flux entre cellules sont lus par le modèle PRT à partir du fichier binaire de budget généré par le modèle GWF.

Dans le sous-problème 2A, 16 particules sont configurées pour être libérées sur les faces horizontales de la cellule contenant le puits. Dans le sous-problème 2B, 100 particules sont libérées également sur les faces horizontales de cette cellule, avec en plus 16 particules supplémentaires émises depuis la face supérieure de la cellule.

Les trajectoires des particules et leurs positions après 1000 jours pour le sous-problème 2A sont visualisées en vue en plan sur la figure 30 correspondante. Les trajectoires du sous-problème 2A ainsi que les points de recharge du sous-problème 2B sont représentés en vue tridimensionnelle sur une autre figure 31 .

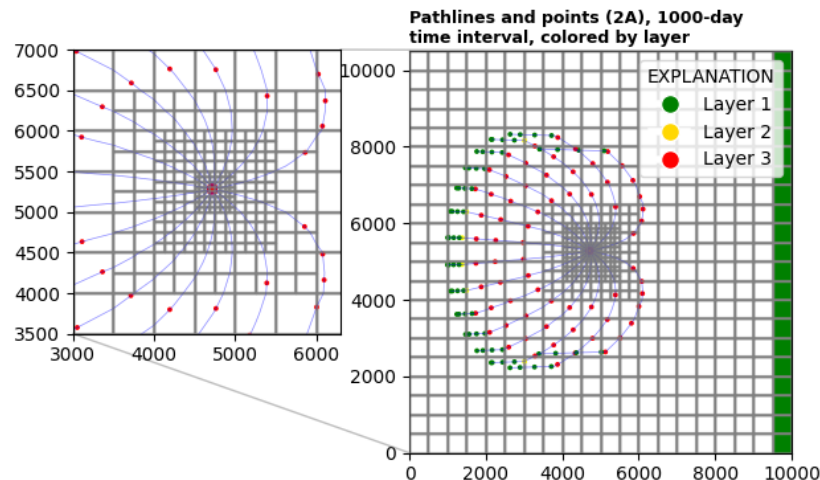


Figure 30: Trajectoires des particules et positions après 1000 jours pour le sous-problème 2A

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

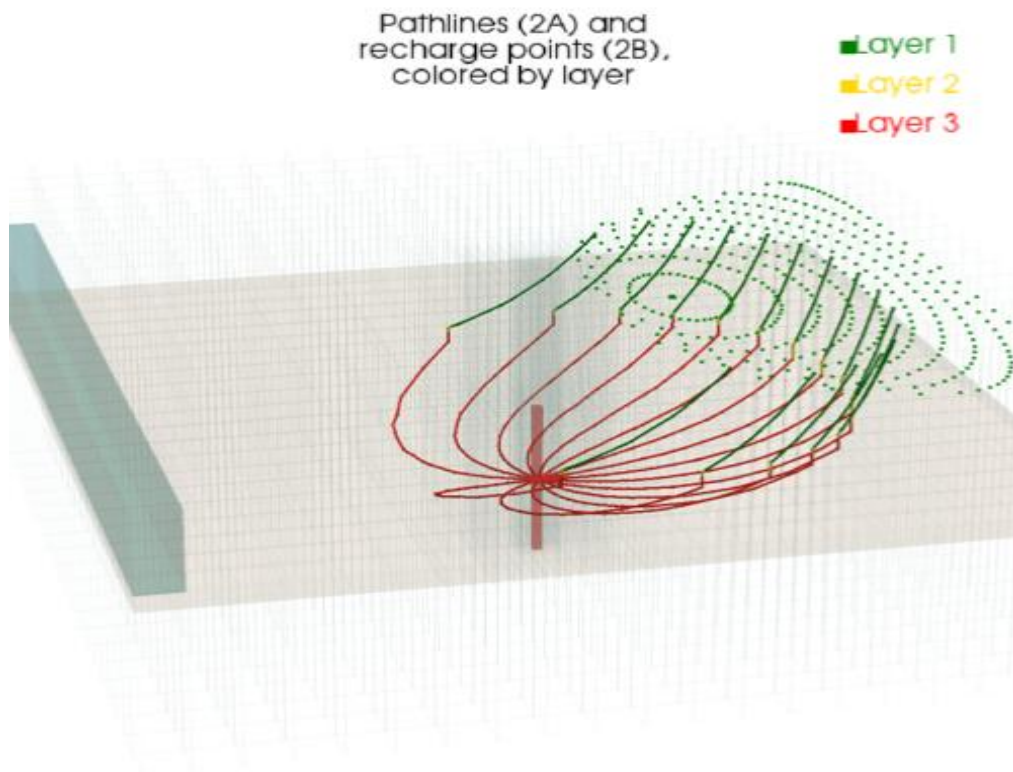


Figure 31: Vue en perspective tridimensionnelle des trajectoires des particules et des positions après 1000 jours pour le sous-problème 2A

### **3.7.1 GMS :**

#### **3.7.1.1 Présentation de GMS :**

Le logiciel GMS (Ground water Modeling System) est une plateforme complète et intuitive dédiée à la modélisation des eaux souterraines. Développé par le Environmental Modeling Research Laboratory de l'Université Brigham Young en collaboration avec l'U.S. Army Corps of Engineers, GMS est conçu pour intégrer des données géospatiales, générer des maillages numériques, calibrer des modèles et visualiser les résultats en 2D et 3D. GMS sert principalement d'interface graphique

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

avancée pour des moteurs de simulation reconnus, tels que MODFLOW, MT3DMS, RT3D, et SEEP2D, facilitant ainsi le développement de modèles hydrogéologiques complexes. Grâce à ses outils puissants de traitement des données géoréférencées, il permet aux utilisateurs de créer des modèles numériques de terrain (MNT), d'intégrer des données de forage, d'appliquer des conditions aux limites, et de simuler des processus d'écoulement et de transport dans les aquifères. L'un des principaux avantages de GMS est sa capacité à gérer de façon interactive l'ensemble du processus de modélisation, depuis la conceptualisation du modèle jusqu'à l'analyse des résultats simulés, tout en offrant une visualisation claire et détaillée du système hydrogéologique . [48]

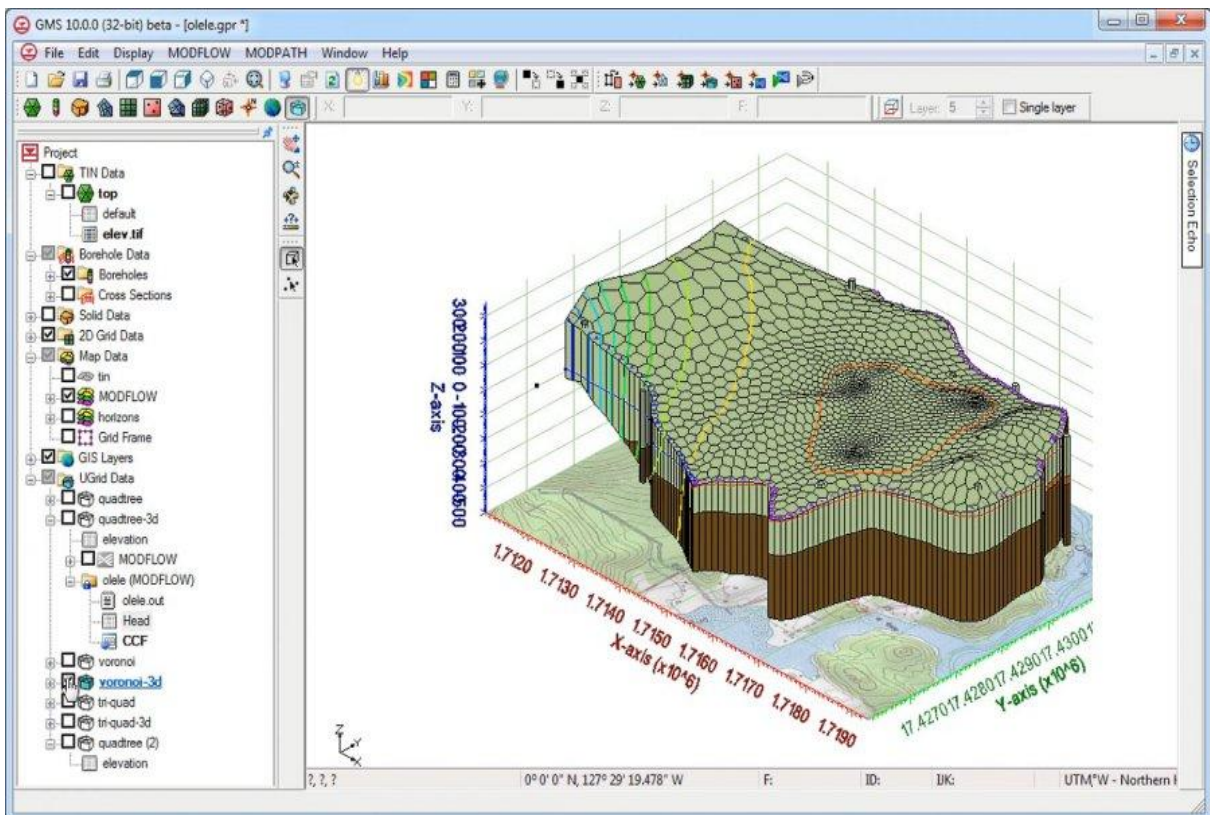


Figure 32 : Interface de Ground water Modeling system [49]

### 3.7.1.2 Processus de traitement des données dans GMS :

Le traitement des données dans GMS suit plusieurs étapes clés. Tout d'abord, les données d'entrée sont importées, incluant les modèles numériques de terrain (MNT), les caractéristiques

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

géologiques, et les données hydrologiques. Ensuite, vient la création de la grille de modélisation et l'attribution des propriétés hydrauliques aux différentes couches. Après cela, on définit les conditions aux limites et les sources/sorties telles que les puits, les rivières et la recharge. Une fois ces étapes terminées, la simulation est lancée, suivie de l'analyse des résultats, qui permet d'ajuster ou de recalibrer le modèle. Enfin, l'exportation des résultats permet leur exploitation pour des études de gestion ou de prévision . [72]

### **3.7.1.3 Technique de visualisation en 3D utilisé par GMS :**

Parmi les techniques de visualisation principales offertes par GMS, on trouve :

► Maillage volumétrique structuré ou non structuré : GMS permet de créer et de manipuler des grilles 3D, qu'elles soient régulières ou irrégulières, adaptées aux besoins spécifiques du modèle.

► Surfaces équipotentielles : Le logiciel génère des cartes piézométriques représentant les lignes de même charge hydraulique, essentielles pour comprendre la distribution des potentiels hydrauliques dans l'aquifère.

► Vecteurs de flux : GMS visualise les directions et magnitudes des écoulements souterrains à l'aide de flèches ou de lignes de courant, offrant une représentation claire des trajectoires de l'eau.

► Coupes transversales : Le logiciel permet de réaliser des coupes verticales à travers le modèle, illustrant la stratigraphie, les niveaux de la nappe et les flux, facilitant ainsi l'analyse de la structure verticale du sous-sol. [73]

### **3.7.1.4 Interpolation des données dans GMS :**

Le GMS , permet de générer des champs continus à partir de données ponctuelles pour la modélisation hydrogéologique. Le logiciel propose plusieurs méthodes adaptées à différents besoins : l>IDW pour une interpolation simple basée sur la distance, le krigeage pour une analyse géostatistique rigoureuse, et les splines pour créer des surfaces lisses idéales pour les paramètres variant progressivement comme les niveaux piézométriques. La méthode Natural Neighbor est

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

quant à elle particulièrement adaptée aux jeux de données irréguliers. Le choix de la méthode dépend à la fois de la nature des données (distribution spatiale, variabilité) et de l'objectif de modélisation. Avant toute interpolation, il est crucial de vérifier la qualité des données et leur système de coordonnées. GMS offre des outils de visualisation (coupes 2D, cartes de contours) et des métriques de validation (erreurs résiduelles) pour s'assurer de la fiabilité des résultats avant leur utilisation dans les modèles d'écoulement comme MODFLOW. Une interpolation bien paramétrée dans GMS constitue ainsi une étape fondamentale pour des simulations réalistes des écoulements souterrains [72]

### **3.7.1.5 Le calcul du volume d'une nappe aquifère avec GMS :**

Le logiciel GMS (Ground water Modeling System) est un environnement de modélisation numérique complet dédié à la simulation des écoulements souterrains et à la gestion des ressources en eaux souterraines. Le calcul du volume d'une nappe aquifère dans GMS s'appuie sur la construction d'un modèle conceptuel ou numérique basé sur les données de terrain (forages, piézométries, géologie, propriétés hydrodynamiques). Une fois les surfaces de la nappe libre et de la base imperméable définies, GMS permet de générer une grille tridimensionnelle intégrant les paramètres hydrogéologiques. En utilisant le moteur de calcul MODFLOW intégré dans GMS, le modèle simule les niveaux piézométriques dans le temps et dans l'espace. Pour estimer le volume d'eau saturée dans la nappe, l'utilisateur peut exploiter la différence entre la surface piézométrique et la base de l'aquifère, en la multipliant par la porosité efficace (si nécessaire) et par l'aire de chaque cellule active du modèle. GMS propose des outils d'analyse intégrés (comme « Water Budget » ou « Cell Query ») permettant de visualiser les volumes stockés ou échangés entre cellules, ce qui facilite l'estimation du volume total contenu dans la nappe. Cette approche numérique permet d'obtenir une estimation dynamique et spatialement répartie du volume de la nappe, tenant compte des variations temporelles et des interactions hydrauliques du système [75]

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

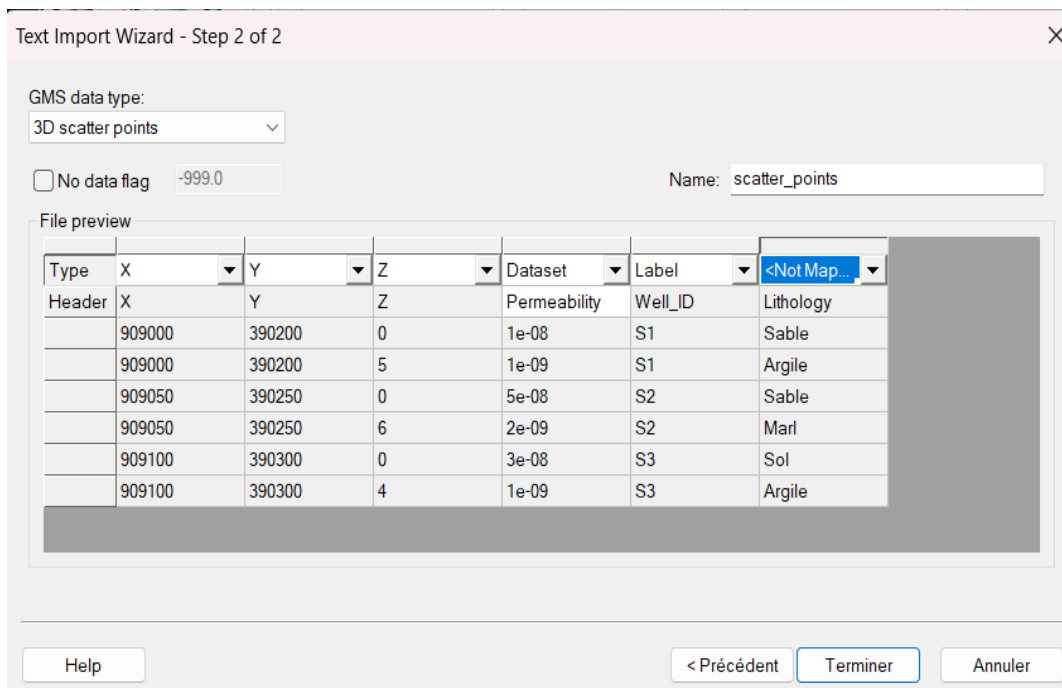
### 3.7.1.6 Essai de modélisation sous GMS :

Pour ce essai nous avons utilisé des données différentes, il s'agit de coordonnées superficielles et la profondeur, la lithologie et la perméabilité du sol (données d'un forage Algérien à Oran :l'exemple précédent du voxler ) .

Dans GMS le fichier a été importé via le chemin suivant : File → Import Scatter→ points

#### 1. Attribution des colonnes (Assign Columns) :

Après l'importation du fichier, les colonnes ont été définies selon le type de données comme suit :



Text Import Wizard - Step 2 of 2

GMS data type:  
3D scatter points

No data flag -999.0 Name: scatter\_points

File preview

Type	X	Y	Z	Dataset	Label	<Not Map...>
Header	X	Y	Z	Permeability	Well_ID	Lithology
	909000	390200	0	1e-08	S1	Sable
	909000	390200	5	1e-09	S1	Argile
	909050	390250	0	5e-08	S2	Sable
	909050	390250	6	2e-09	S2	Marl
	909100	390300	0	3e-08	S3	Sol
	909100	390300	4	1e-09	S3	Argile

Help < Précédent Terminer Annuler

Tableau 8 : Attribution des colonnes

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

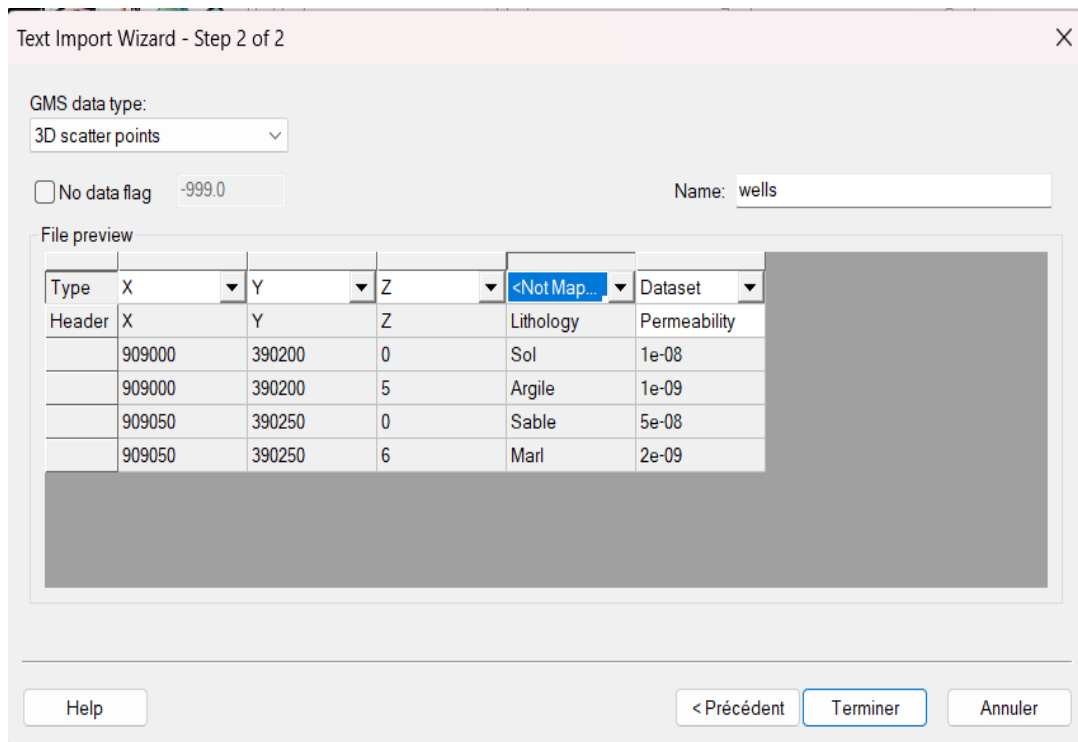


Tableau 9 : Attribution des colonnes (Wells)

### **2. Visualisation des données en trois dimensions :**

Après l'assignation des colonnes, les données ont été représentées en 3D à l'aide de la commande Project après créer 3D Grid , par : project→new→3D Grid

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

Create Finite Difference Grid

X-Dimension

Origin: 908959.1

Length: 181.599999999998 (m)

Number cells: 10

Cell size: 10.0 (m)

Bias: 1.0

Limit cell size: 50.0 (m)

Y-Dimension

Origin: 390205.5

Length: 89.200000000012 (m)

Number cells: 10

Cell size: 10.0 (m)

Bias: 1.0

Limit cell size: 50.0 (m)

Z-Dimension

Origin: -0.7

Length: 10.0 (m)

Number cells: 10

Cell size: 4.0 (m)

Bias: 1.0

Limit cell size: 20.0 (m)

Orientation / type

MODFLOW

Orientation...

Type: Cell centered

Rotation about Z-axis: 0.0

Help... OK Cancel

Tableau 10 : Création du grille

► Pour l'interpolation faut avoir la colonne présenter dans (figure 34 ) , en suite clique sur :  
Perméabilité → iterpolated to → options → IDW .

# Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

## 3. Résultats : Modèle obtenus :

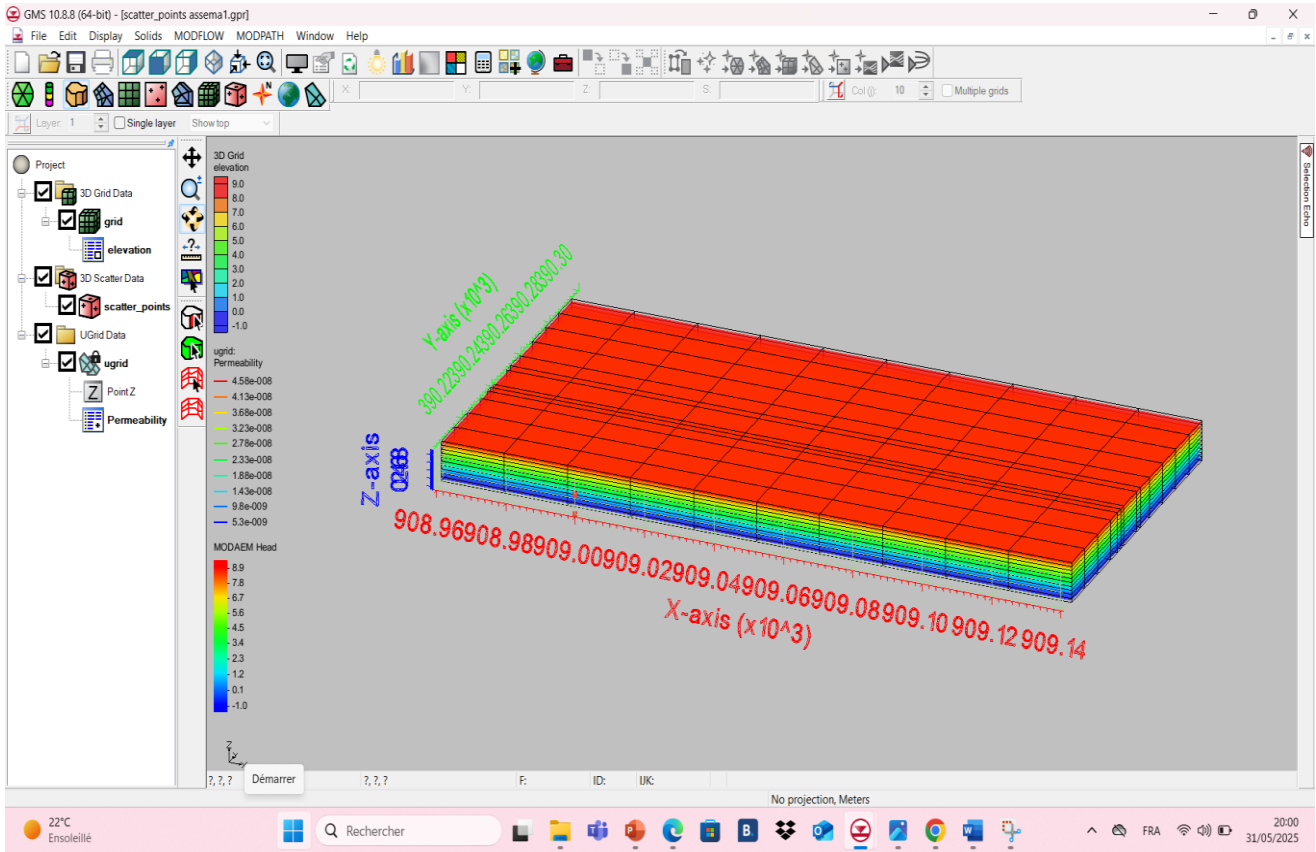


Figure 33:Modèle en 3D ( Perméabilité par rapport à l'élévation ) sous GMS

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

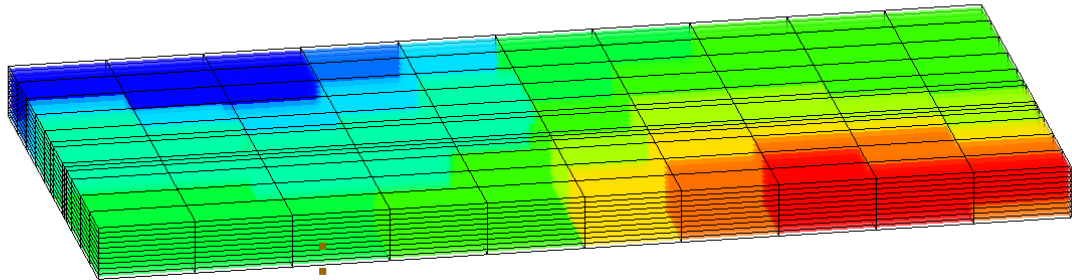


Figure 34 : Répartition tridimensionnelle de la perméabilité dans le modèle GMS

### **4. Analyse :**

Les deux figures représentent des visualisations extraites du logiciel GMS à partir des mêmes données de forage utilisées dans le modèle préliminaire développé sous Voxler. Elles permettent d'approfondir l'analyse des caractéristiques du milieu souterrain.

#### **Répartition de la perméabilité :**

Cette figure illustre la distribution spatiale des valeurs de perméabilité dans les formations traversées .

Les zones en bleu correspondant à des perméabilités faibles, souvent associées à des couches argileuses peu perméables .

### **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

Des zones en jaune ou orange indiquant des perméabilités élevées, typiques des formations plus poreuses comme le grès ou le calcaire.

Ce contraste met en évidence le rôle de la lithologie dans le contrôle de l'écoulement souterrain.

#### **Élévation topographique :**

Comme est montré dans la figure 34 , la variation de l'élévation du terrain sur la zone d'étude.

- La zone à haute élévation dans la partie supérieure droite, qui représente un point haut topographique
- La zone à faible élévation dans la partie inférieure gauche, susceptible d'agir comme zone de sortie.

Ces deux visualisations combinées offrent une base solide pour la construction d'un modèle numérique hydrogéologique complet, en intégrant à la fois la structure géologique et les paramètres hydrauliques.

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation

### 3.8. Les données obligatoires et les données facultatives dans les trois logiciels : MODFLOW, GMS, VOXLER :

Logiciel	Données obligatoires	Données facultatives
<b>GMS</b>	- Grille ou maillage - Niveaux piézométriques - Paramètres hydrauliques (K, S, Ss) - Conditions aux limites	- Données de forages - Courbes de pompage - Recharge naturelle - Contaminants
<b>VOXLER</b>	- Coordonnées X, Y, Z - Une valeur à visualiser (ex : concentration, température)	- Données de forage (casing, lithologie) - Grilles interpolées - Champs vectoriels (écoulement)
<b>MODFLOW</b>	- Discrétisation du modèle (dimensions, maillage) - Conditions aux limites - Propriétés hydrauliques (K, Ss, Sy) - Conditions initiales (niveau piézométrique)	- Recharge (Rech) - Drainage, rivières, lacs (DRN, RIV, LAK) - Pompages (WEL) - Transport de solutés (MT3DMS)

Tableau 11 : les données obligatoires et les données facultatives dans Voxler,Gms,Modflow

### 3.8. Méthodologie générale de la modélisation des nappes souterraines :

Après avoir présenter le process de traitement pour chaque logiciel , ci-après la procédure générale depuis la collecte de données jusqu'au produit final ( modèle 3D et interprétation ) :

## Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation



Figure 35: processus de modélisation des eaux souterraines

## **Chapitre 03 : État de l'art sur les techniques de visualisation**

### **3.9 Conclusion :**

Ce chapitre présente un aperçu général des techniques fondamentales utilisées pour le traitement et la représentation 3D des couches aquifères. Il aborde les méthodes de visualisation , ainsi que les techniques d'interpolation , en plus de la représentation des couches géologiques et piézométriques. Trois logiciels principaux ont également été analysés : Voxler, MODFLOW et GMS, en mettant l'accent sur leurs fonctionnalités, les méthodes de visualisation et d'interpolation qu'ils utilisent, ainsi que sur le calcul du volume d'eau souterraine. Le chapitre se conclut par une présentation des données essentielles requises pour chaque logiciel et il propose une méthodologie générale pour la modélisation des couches aquifères. Ce travail constitue une référence de base pour établir une démarche structurée et accessible à toute personne souhaitant modéliser en 3D les nappes souterraines.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

## **Conclusion générale**

La compréhension approfondie des nappes aquifères et la modélisation tridimensionnelle de leur comportement sont devenues des enjeux majeurs dans le contexte actuel de gestion durable des ressources en eau souterraine. Ce travail a permis d'aborder de manière progressive et structurée les différents éléments nécessaires à l'élaboration d'une méthodologie fiable pour la modélisation 3D des nappes aquifères.

Dans notre premier chapitre, une base théorique a été établie en définissant les principaux concepts relatifs aux aquifères, leurs typologies, leurs propriétés hydrodynamiques et les défis associés à leur exploitation. Cette étape a souligné l'importance cruciale des nappes dans l'équilibre hydrologique et socio-économique.

Ensuite, l'accent a été mis sur la phase de collecte et d'organisation des données, étape préalable indispensable à toute modélisation fiable. Cela inclut les données topographiques (MNT, GPS), géologiques, hydrogéologiques, piézométriques, climatiques et hydrologiques. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) s'est révélée essentielle pour structurer, analyser et visualiser ces données spatiales.

Le troisième chapitre a porté sur les techniques de visualisation et d'interpolation des données en 3D, en passant en revue les méthodes classiques (IDW, krigeage, spline, etc.) et les outils logiciels spécialisés. Les logiciels Voxler, MODFLOW et GMS ont été étudiés en détail pour mettre en lumière leurs capacités respectives en termes de traitement, d'analyse et de représentation volumique des aquifères.

Enfin, ce travail a abouti à la proposition d'une démarche méthodologique intégrée qui s'appuie sur :

- Une acquisition rigoureuse et multidisciplinaire des données ;
- Une structuration et une analyse cohérente via les SIG et les interpolateurs ;
- Une modélisation 3D adaptée aux objectifs de simulation, de visualisation et de gestion quantitative des nappes.

Ce mémoire constitue donc une base de réflexion méthodologique pour les futurs projets de modélisation hydrogéologique, tout en soulignant que la précision et la pertinence des résultats dépendent fortement de la qualité des données initiales et du choix judicieux des outils logiciels.

## Bibliographie

- [1] J. v. d. g. \_ . j. margat, Groundwater around the world : A geographic synopsis, Balkema CRC Press , march 2013.
- [2] «SIGES BRETAGNE,» [En ligne]. Available: [https://sigesbre.brgm.fr/Qu-est-ce-qu-un-aquifere.html?utm\\_source](https://sigesbre.brgm.fr/Qu-est-ce-qu-un-aquifere.html?utm_source).
- [3] M. R. e. c. Cosandy, Hydrologie continentale, armande colin, 2012.
- [4] M. Villeneuve, «Géologie des bassins sédimentaires,» *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, p. 451–461, 1988.
- [5] Y. Bouroubi, «CHAPITRE III : Les systèmes aquifères,» Janvier 2021. [En ligne]. Available: [http://tele-ens.univ-oeb.dz/moodle/pluginfile.php/155611/mod\\_resource/content/2/Chapitre%203.pdf](http://tele-ens.univ-oeb.dz/moodle/pluginfile.php/155611/mod_resource/content/2/Chapitre%203.pdf).
- [6] M. C. e. Y. M. e. M. Hamadi, «caractéristique hydrogéologie et hydrodynamique de la nappe phréatique de baraga(centre baraga de tunisie),» *université de gebes et institut supérieure de la science technique de l'eau*, pp. 3-4, 23 octobre 2013.
- [7] République tunisienne, «ressources en eau environnement et changement climatique,» *Eau-environnement-climate2018*, 2018.

- [8] «IDENTIFICATION HYDRODYNAMIQUE,» 2021. [En ligne]. Available: [https://fac.umc.edu.dz/fst/fichiers/CHAPITRE-4.pdf?utm\\_source](https://fac.umc.edu.dz/fst/fichiers/CHAPITRE-4.pdf?utm_source).
- [9] D. O. FULVIE, «Présentation des méthodes d'interprétation des paramètres hydrodynamiques des aquifères de socle du département de Daoukro à partir des essais de pompage de courtes durées,» Université Nangui Abrogoua, COTE D'IVOIRE, 2015-2016.
- [10] C. G. F. A, «SIGES concernant les nappes du bassin Seine-Normandie,» *nappes du bassins seine normandie*, 2001.
- [11] C. G, dictionnaire francais dydraugologie, 1977.
- [12] C. .G, hydraugologie, paris, 1982.
- [13] M. B. A. K. T. H. G. L. P. T. S. R. I. H. M. L. S. D. R. L. David Rey, «Groundwater flowpath characteristics drive variability in per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) loading across a stream-wetland system,» *Science of the Total Environment*, 2025.
- [14] G. C, La pollution des eaux souterraines en France, Editions BRGM,262 p, 1992.
- [15] Y. Géraud, Perméabilité des roches et loi de Darcy, Strasbourg: Benoît Urgelli, 23/03/2000.
- [16] G. marslly, cours dydrolaugie, paris: universite de paris, 2004.

- [17] R. J.-f. Foucault A, Dictionnaire de géologie, 5 édition dunod, 2001, p. 379.
- [18] B. boualam, cours hydrogéologie, université de ouargla, mars 2021.
- [19] n. l. étudiants.
- [20] E. ., C. S. (. d. t. ., U. B. M. (. (. Hedbani, « Mise en évidence de l'intrusion marine dans la nappe côtière de Skikda(N-E ALGERIEN) [ressource textuelle, sauf manuscrits],»  
*Magister : Annaba : Université Badji Mokhtar : 2006, ,2006.*
- [21] A.-H. a. W. .T, Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion Nature Géoscience, 2012 , pp. 853-861.
- [22] R. Maliva, Economics of Managed Aquifer Recharge, 2020, p. 124 \_ 964.
- [23] A. Werner, « Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges,» *Advances in Water Resources*, 2013.
- [24] N. Voulvoulis, «The EU Water Framework Directive: From European Directive to National Research Implementation,» *Environmental Science and Pollution Research*, 2017.
- [25] Y. .. Y, «Groundwater and Climate Change: Mitigating the Rising Risks.,» UNESCO, 2022.

- [26] A. Khelalfa, «Développement d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) par recoupement de plusieurs bases de données : Cas de la région de Staoueli,» École Nationale Supérieure d'Hydraulique, Alger, Alger, 2020.
- [27] H. M. S. e. I. I. M. sani, *Elaboration d'un modèle numérique d'élévation*, Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib Ain Témouchen, 2016/2017.
- [28] «<https://geoportail.wallonie.be/>,» 2022. [En ligne].
- [29] ZAOUI.N, 2023.
- [30] (*Bhang et Schwartz, 2008*).
- [31] I. V. Florinsky, *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, Academic Press (Elsevier), 2nd Edition, 2016, pp. 201-240.
- [32] S. L. J.-P. a. E. M. Rezak, «Validation d'un modèle numérique de terrain adapté à la modélisation hydrologique régionale sur l'Algérie du Nord,» *Hydrological Sciences Journal*, 57(5), p. pp. 928–941, 2012.
- [33] 1887. [En ligne].
- [34] *Kermarrec, G., Klos, A., Lenczuk, A., & Bogusz, J. (2023)*.

[35] [En ligne].

[36] G. B. Asquith et C. R. Gibosn, *Basic Well Log Analysis for Geologists*, American Association of Petroleum Geologists, 2011.

[37] M. S. Chowdhury, «Production Logging and its Implementation: A Technical Review,» *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering (IJPPE)*, pp. Volume 5, Issue 2 PP 42-51, 2019.

[38] Sadem, «researchgate,» 1980. [En ligne].

[39] D. B. FATHE, Département de Génie Civil et d'Hydraulique: Université 08 Mai 1945 – Guelma , 2017.

[40] J. C. D. e. A. A. H. E. S, *Geophysical Methods in Geology*, Wiley-Interscience, 2002.

[41] A. P. a. V. Andréassian, «An underground view of surface hydrology: what can piezometers tell us about,» chez *An underground view of surface hydrology: what can piezometers tell us about*, 12 January 2023.

[42] [En ligne].

[43] S. M. Lise Ponchant, *La piézométrie ou mesure de la profondeur de la surface des nappes*, Ecole d'Hiver, 2015.

[44] [En ligne].

[45] guide des pratiques hydrologiques.

[46] R. Clement, *Etude de suivi des injections des lixiviats dans les massifs de déchets*, 2010.

[47] «Clim Essences,» [En ligne].

[48] «study master,» [En ligne].

[49] «organisation météorologique mondiale,» 2008. [En ligne].

[50] Acquisition et traitement des données hydrologiques, vol. volume I Genève , 1994.

[51] I. Masser, «The Role of GIS in Spatial Data Infrastructures,» pp. 1-15, 2019.

[52] «Représentation et modélisation des informations géographiques dans un SIG,» [En ligne].

[53] H. S, « Visualisation scientifique 3D,» 2003.

[54] M. HASSIBA, *Estimation dans le krigeage: etude hydraulique*, OUARGLA, 2017.

- [55] P. G. Australia, Éd., A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists, January 2008.
- [56] «Esri,» [En ligne].
- [57] R. Kress, «Numerical Analysis. Springer.,» 1998.
- [58] K. Bédard, La construction de modèles géologiques 3D: de la standardisation au tutoriel, 2006.
- [59] BRGM., correction des données piézométriques de forage influencés par des pompages, 2000.
- [60] C. W. Fetter, Hydrogéologie appliquée, 2001.
- [61] P. A. AFIRI, Écrivain, *CARTE ET COUPE GEOLOGIQUE*. [Performance]. 2019/2020.
- [62] A. GUISTADO, 2015.
- [63] J. Margat, Les Eaux souterraines dans le monde, 2008.
- [64] «Softpedia,» 16 août 2022. [En ligne]. Available: <https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/Voxler.shtml>.

- [65] Voxler User Guide, Golden Software.
- [66] H. Varum, «Research on the 3D Visualization Method of Web-Based Seismic Wave CT Results and the Application in Underground Caverns,» *Buildings* , 14 novembre 2024.
- [67] G. Software, *Voxler® User's Guide (Version 4)*, 2015.
- [68] *Voxler User's Guide (Version 4)*. [Performance]. Golden Software, 2023.
- [69] «Waterloo Hydrogeologic,» 2012. [En ligne].
- [70] A. W. Harbaugh, A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey (USGS), 1988..
- [71] R. Winston, ModelMuse—A Graphical User Interface for MODFLOW, 2005.
- [72] H. G.-H. J. & L. L. Zhou, «Data preprocessing approaches for groundwater modeling using MODFLOW,» *Journal of hydraulique* , 2021.
- [73] G. Pinder, Groundwater modeling using geographical information systems, New York : Wiley, 2002.
- [74] Aquaveo, *GMS Groundwater Modeling System - User's Guide (Version 10.4)*, 2019.

- [75] *the groundwater modeling système*. [Performance]. Aquaveo, 31 juillet 2012.
- [76] M. P. W. W. W. & H. R. J. Anderson, *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*, 2015.
- [77] H. khabbaz, «Saltwater Intrusion into Coastal Aquifers and Associated Risk Management,» *costal reasearch*, May 2022.
- [78] *Cours de méthodes numériques*, khmis meliana, univ-dbk.m.
- [79] «civil engineering software database,» [En ligne].
- [80] M. e. H. A. McDonald, *Modèle modulaire tridimensionnel de l'écoulement des eaux souterraines par différences finies*, United States Geological Survey, 1988.
- [81] H. G.-H. J. & L. L. Zhou, «Data preprocessing approaches for groundwater modeling using MODFLOW,» *Journal of Hydrology*, 2021.