

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Présenté par : BOUDJEHM INES

BENOUMEHNI AISSA

---

---

# Thème : Etude De Mise En Place Des Périmètres De Protection de Forage

---

---

Sous la direction de : Pr

MANSOURI Rachid

---

Juin 2023

---

# Remerciement

*Ce travail n'avait pas pu être effectué et achevé sans l'assistance et le soutien des personnes qui m'ont donné l'occasion de me lancer dans cette longue aventure.*

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers le directeur de ce mémoire Monsieur MANSOURI RACHID pour m'avoir fait confiance, puis pour m'avoir guidée, encouragée, conseillée tout en me laissant une grande liberté de pensée et de réalisation.*

*J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de lire et juger notre travail.*

*Je remercie vivement ma petite famille, mes très chers parents, mon cher frère et mes chères sœurs.*

*Et enfin je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à ma famille :*

*Particulièrement à mon père « Mohamed Taieb » pour le goût à l'effort qu'il suscité en moi, de par sa rigueur.*

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ses prières*

*« Fella » ma mère. A mon support dans ma vie, qui m'a appris m'a supporté et ma dirigé.*

*A ma source d'amour et d'affection, mes chères sœurs : « Yamina, Meriem, Yasmine et Malek ».*

*Mes beaux-frères : « Ali, Lotfi et Khaled ».*

*A mon cher neveu et mes chères nièces : « Mustapha, Sadja et Yakine ».*

*A ma grand-mères : « Dhaouia » Que dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*

*Mes oncles aussi « Nouredine, Tahar, Ramdan , Azzouz et Houcine Tik » et « mes Tantes ».*

*A mes amis, en souvenir des bons moments qui nous avons passés ensemble « Hani, Hicham, Mouiz, Safwane, Islem »*

*Une forte dédicace à « Malek, Khayro, Saif, Youbes, Abdenour, Housseem, Nedjmou et fares sans oublier Seyf eddine, Salem et Aymen ».*

*A mon binôme « Boudjahem Ines » pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*Je dédie ce modeste travail à monsieur « Mansouri Rachid », qui en tant professeur encadrent, s'est toujours montré à l'écoute très disponible tout au long de la réalisation mon projet.*

**AISSA**

# Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce Modest travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.



A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et toute mon respect : Mon Cher **PERE**



A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse

Mon Adorable **MERE**



A ma chère Sœur **MERJEM** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.

Que Dieu le protège et leur offre la chance et le bonheur



A mon adorable petit sœur **WEDJDEN** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille



A toi Mon Frère **TAKI EL DINNE** n'abandonne pas car la vie c'est ça, continuer le voyage, poursuivre tes rêves,

Déverrouiller le temps, parcourir les décombres, et découvrir le ciel.

En gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apportée, tu m'as soutenue, réconfortée et encouragée



A Mes **ONCLES** et Mes **TANTES**. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie



A tous les **COUSINS**, les **VOISINS** et les **AMIS** que j'ai connu jusqu'à maintenant.

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.



Sans oublier mon binôme **AISSA** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet



Un dédicace tout particulier **A Ma Super Promotion De Master 2 Un Par Un**. Ces 5 Ans ont été riches en belles émotions sur beaucoup de plan,

J'en garde des souvenirs impérissables.

Merci pour l'ambiance qui a contribué à des moments d'échanges culturels et personnels très forts.

Des fois, les mots ne suffisent pas pour exprimer tout le bien qu'on ressent !

**Vous Remercie Du Fond Du Cœur**

**Pour Toutes La Famille**

**BOUDJEHEM**

**Sans Exception**

**Juste MERCI à vous !!!**

**INES**

# Résumé

## **Abstract**

When an aquifer becomes seriously polluted, the re-establishment of its natural quality becomes very difficult, even if the pollutant source is already inactive. Usually, the pollution of an aquifer is detected a long time after the start of the first pollution event and, by that time, the polluted volume of the aquifer may be considerable.

The management of potential contaminant sources within wellhead protection area (WHPA) is a recognized preventive approach to preserve the quality of exploited groundwater resources. Numerous methods have been proposed for the delineation of WHPA. They range from simple to very complex and their cost varies accordingly. Until now, a few comparative studies have been conducted on WHPA delineation methods in Algeria. A need was thus felt for a comparative study that would also provide guidelines on the minimal level of characterization required and the most effective methods available for delineating a WHPA. The study covers the delineation of WHPA for wells. The study was carried out in the Bekheria area. Analytical methods are user friendly and easy to apply, and some of them can give sound solutions and also more precision in the delineation of WHPA. Numerical models can also give robust solutions in the case of complex hydrogeological systems, but their use implies the availability of large amounts of complex information and also more expertise, which makes their application more expensive.

The WHPA delineation methods compared include Volumetric Flow Equation (Calculated Fixed Radius (CFR) equation and the Recharge equation) and simple analytical methods namely the Wyssling method and Krijgsman-Lobo-Ferreira method.

**The key Words:** Protection perimeter, Drilling, Well, Aquifer, radius of influence, catchment area, drawdown cone.

## Résumé

La pollution d'un forage peut persister pendant une dizaine d'années, voire être irréversible selon l'envergure de la pollution, même lorsque la source polluante se trouve dans état inactive. La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des périmètres de protection (PDP) déterminés autour des ouvrages de captage constitue une méthode efficace de préservation de la qualité de l'eau souterraine. Le PDP circonscrit un territoire comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ou de plusieurs ouvrages de captage (puits ou sources) et à l'intérieur duquel des contaminants peuvent migrer et éventuellement contaminer le ou les ouvrages de captage. Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simple d'application à des méthodes très complexes et dispendieuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. La principale problématique dans l'établissement des PDP consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste de ces périmètres à partir d'un minimum d'informations.

En Algérie, jusqu'à présent, rare sont les études comparatives qui ont été menées sur la problématique de délimitation PDP. Le besoin s'est donc fait sentir d'une étude comparative qui fournirait également des lignes directrices sur le niveau minimal de caractérisation requis et les méthodes les plus efficaces disponibles pour délimiter un PDP. L'étude a été réalisée dans la région de la Bekkaria. Ainsi, les principaux objectifs de ce mémoire sont d'appliquer et de comparer différentes méthodes de détermination des PDP. Les méthodes analytiques sont conviviales et faciles à appliquer, et certaines d'entre elles peuvent donner des solutions solides et aussi plus de précision dans la délimitation de WHPA. Les modèles numériques peuvent également donner des solutions robustes dans le cas de systèmes hydrogéologiques complexes, mais leur utilisation implique la disponibilité de grandes quantités d'informations complexes et aussi plus d'expertise, ce qui rend leur application plus coûteuse.

Dans le cadre de ce travail, les méthodes comparées sont des équations de bilan de masse (infiltration et cylindre), des équations analytiques simples, à savoir, la méthode de Wyssling et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira.

**Les mots clés :** périmètre de protection, forage, puits, aquifère, rayon d'influence, zone de captage, cône de rabattement,

## الملخص :

يمكن أن يستمر تلوث البئر لمدة عشر سنوات، أو حتى لا رجعة فيه اعتمادًا على مدى التلوث، حتى عندما يكون المصدر الملوث في حالة غير نشطة. تشكل إدارة المصادر المحتملة للتلوث المتضمنة في محيط الحماية (PDP) المحددة حول أعمال مستجمعات المياه طريقة فعالة للحفاظ على جودة المياه الجوفية. تحدد PDP المنطقة التي تتكون من السطح والتربة التحتية حول واحد أو أكثر من أعمال تجميع المياه (الآبار أو الينابيع) والتي يمكن أن تنتقل داخلها الملوثات وربما تلوث أعمال مستجمعات المياه. هناك عدة طرق لتحديد PDPs. تختلف هذه الطرق من بسيطة للتطبيق إلى طرق معقدة للغاية ومكلفة. بشكل عام، كلما سمحت الطريقة بتكامل الخصائص الجيولوجية والهيدرولوجية والهيدروجيولوجية للبيئة، كلما كانت أكثر دقة. تتكون PDP من اختيار طريقة مما يضمن تحديدًا واقعيًا لهذه المحيطات من الحد الأدنى من المعلومات.

في الجزائر، حتى الآن، تم إجراء القليل من الدراسات المقارنة حول مسألة ترسيم حدود PDP. لذلك نشأت الحاجة إلى دراسة مقارنة من شأنها أن توفر أيضًا إرشادات حول الحد الأدنى من التوصيف المطلوب والطرق الأكثر فاعلية المتاحة لتحديد PDP. أجريت الدراسة في منطقة بكاريا. وبالتالي، فإن الأهداف الرئيسية لهذه الأطروحة هي تطبيق ومقارنة الطرق المختلفة لتحديد PDPs. تعتبر الطرق التحليلية سهلة الاستخدام وسهلة التطبيق، ويمكن أن يوفر بعضها حلولًا صلبة وأيضًا المزيد من الدقة في تحديد WHPA. يمكن للنماذج العددية أيضًا أن تقدم حلولًا قوية في حالة الأنظمة الهيدروجيولوجية المعقدة، لكن استخدامها يعني توفر كميات كبيرة من المعلومات المعقدة وأيضًا المزيد من الخبرة، مما يجعل تطبيقها أكثر تكلفة.

في سياق هذا العمل، فإن الطرق التي تمت مقارنتها هي معادلات توازن الكتلة (التسلل والأسطوانة)، معادلات تحليلية بسيطة، وهي طريقة ويسلينج والتي وضعها كريجسمان ولوبو فيريرا. **الكلمات المفتاحية:** محيط الحماية، الحفر، البئر، طبقة المياه الجوفية، نصف قطر التأثير، منطقة متجمعات المياه، مخروط الانحدار،

# Sommaire

## Sommaire

---

Listes des abréviations .....	I
Listes des tableaux .....	II
Listes des figures .....	III
Introduction et Objectif visés .....	1
Chapitre I : Les eaux souterraines, le nappes et les aquifères .....	5
1.1 Introduction .....	5
1.2 Les aquifères .....	6
1.2.1 Aquifère à nappe libre .....	8
1.2.2 Nappe captive .....	9
1.2.3 Nappe d'eau perché .....	9
1.3 Les porosités hydrauliques .....	10
1.3.1 La porosité .....	12
1.3.2 La perméabilité .....	15
1.3.3 La transmissivité (T) .....	16
1.2.4 Le coefficient d'emmagasinement .....	16
Chapitre II : Les ouvrages de captage .....	18
2.1 Introduction .....	18
2.2 Les puits .....	19
2.3 Les forages .....	19
2.4 Théorie simplifiée de l'essais par pompage .....	20
2.4.1 Le rayon d'influence .....	24
2.4.2 Débit Spécifique .....	26
2.4.3 Débit Critique .....	26
2.4.4 Débit d'écoulement des nappes .....	27
Chapitre III : La pollution des eaux souterraines .....	28
3.1 Généralités sur la pollution des eaux souterraines .....	28
3.2 La vulnérabilité des nappes à la pollution .....	34
3.3 Migration des polluants au sein des milieux souterrains .....	36
Chapitre IV : La protection de captage et le cadre juridique .....	39
4.1 introduction .....	39
4.2 Les zones de protection .....	40
• Périmètre de protection immédiate .....	40

---

## Sommaire

---

• Périmètre de protection rapproché .....	40
• Périmètre de protection éloignée .....	40
<b>4.3 Les activités interdites au niveau de chaque périmètre .....</b>	<b>43</b>
• Au niveau de la zone S1 .....	43
• Au niveau de la zone S2 .....	43
• En ce qui concerne la zone S3 .....	44
<b>4.4 Délimitation de zones de protection .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4.1 Définition et objectif .....</b>	<b>44</b>
• Protection immédiate (Zone I) .....	45
• Protection rapproché (Zone II) .....	45
• Protection éloignée (Zone III) .....	45
<b>4.4.2 Cadre réglementaire pour la protection des captages dans quelques pays et en Algérie .....</b>	<b>46</b>
➔ En France .....	46
➔ En Allemagne .....	46
➔ En Espagne .....	46
➔ Au Royaume-Uni .....	46
➔ Aux USA .....	47
➔ En Belgique .....	48
➔ Aux Pays-Bas .....	48
➔ En Suisse .....	48
➔ Au Danemark .....	49
➔ Au Québec .....	50
<b>4.4.3 Aspect législatif de la protection des eaux en Algérie .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4.3.1 Article 38 .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4.3.2 Article 39 .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.3.3 Article 41 .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.3.4 Article 42 .....</b>	<b>53</b>
<b>Chapitre V : les approches utilisés pour la détermination des périmètres de protection (PDR) .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1.1 Délimitation de la zone de protection immédiate .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1.2 Délimitation de la zone de protection rapprochée .....</b>	<b>55</b>

---

## Sommaire

---

5.1.3 Délimitation de la zone de protection éloignée .....	56
5.2 Critères de délimitation des zones de protection .....	57
5.2.1 Distance l'établissement .....	57
5.2.2 Rabattement .....	57
● Zone d'influence .....	57
● Zone d'appel .....	57
5.2.3 Limites d'écoulement .....	57
5.2.4 Temps de transfert .....	58
5.2.5 Capacité d'atténuation du sol .....	59
5.3 Les différentes approches .....	59
5.3.1 Approche 1 : Rayon fixe arbitraire AFR (Arbitrary Fixed Radius) .....	61
5.3.2 Approche 2 : méthode du rayon fixe calculé CFR (calculated fixed raduis).....	62
5.3.2.1 Equation volumétrique .....	64
5.3.2.2 Equation de Darcy .....	66
5.3.2.3 Méthode d'infiltration .....	67
5.3.3 Approche 3 : Equations analytiques (équation d'écoulement uniforme) .....	67
5.3.4 Approche 4 : Cartographie hydrogéologique .....	70
5.3.5 Approche 5 : Méthodes numériques .....	72
5.3.6 Approche 6 : Méthode krijgsman & Lobo-Ferreira .....	73
5.3.7 Approche 7 : La méthode de Wyssling .....	75
Chapitre VI : Présentation de la zone d'étude .....	78
6.1 Situation géographique de la zone d'étude .....	79
6.2 Aperçue hydrogéologique .....	82
6.2.1 La carte piézométrique .....	82
6.2.2 Carte de transmissivité .....	83
6.2.3 Carte de perméabilité .....	84
6.2.4 Les données des forages de la région d'étude .....	84
Chapitre VII : Détermination des périmètres de protection .....	89
7.1 Introduction .....	89
7.2 Calcul de la recharge .....	90
7.2.1 Définition de la recharge .....	90

---

## Sommaire

---

<b>7.2.2 Les différents méthodes d'estimation de la recharge .....</b>	<b>92</b>
<b>7.2.2.1 Le bilan Hydrique .....</b>	<b>92</b>
<b>➔ Formule de Turc .....</b>	<b>94</b>
<b>➔ Formule de Coutagne .....</b>	<b>94</b>
<b>7.2.2.2 L'évaporation / l'évapotranspiration .....</b>	<b>94</b>
• <b>L'évapotranspiration Réelle (ETR) .....</b>	<b>95</b>
• <b>L'évapotranspiration de Référence (ET<sub>0</sub>) .....</b>	<b>95</b>
<b>7.2.2.3 Estimation du Ruissellement .....</b>	<b>98</b>
<b>7.2.2.4 Estimation Infiltration (N) .....</b>	<b>99</b>
<b>7.3 Application des approches sélectionnées .....</b>	<b>99</b>
<b>Conclusion et Perspective .....</b>	<b>105</b>
<b>Listes des références bibliographiques .....</b>	<b>IV</b>

---

# Listes Des Abréviations

## Listes des Abréviations

---

### Listes des Abréviations

**AAC** : Aire d'Alimentation de Captage

**AFR** : Arbitrary Fixed Radius

**BAC** : Bassin d'Alimentation de Captage

**BRGM** : Bureau de Recherche Géologique et Minière

**BV**: Bassin Versant

**CFR**: Calculated Fixed Radius

**ET** : Evapotranspiration

**ETM** : Eléments Trace Métallique

**ETP** : Evapotranspiration Potentielle

**ETR** : Evapotranspiration Réelle

**IGME** : Instituto Geológico y Minero de España

**PDP** : Périmètre De Protection

**PPE** : Périmètre de Protection Eloignée

**PPR**: Périmètre de Protection Rapproché

**SDWA**: Safe Drinking Water Act

**USEPA**: United States Environmental Protection Agency

**WHPA**: Wellhead Protection Areas

**ZA** : Zone d'Atténuation

**ZC** : Zone de Contribution

**ZI** : Zone d'Influence

**ZIS** : Zone d'Interface Sol

**ZNS** : Zone Non Saturée

**ZS** : Zone Saturée

**ZSCE** : Zones Soumises à Contraintes Environnementales

**ZT** : Zone de Transport

---

**Listes**

**Des**

**Tableaux**

## Listes des Tableaux

---

### Listes des Tableaux :

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1.1</b>	Porosité efficace et porosité totale	<b>14</b>
<b>2.1</b>	Formules pour le calculs du rayon d'influence	<b>25</b>
<b>4.1</b>	Comparaison des zones de protection mises en place dans plusieurs pays	<b>51</b>
<b>5.1</b>	Les approches recommandées	<b>60</b>
<b>5.2</b>	Rayons fixes arbitraires autour de sites	<b>62</b>
<b>5.3</b>	Les valeurs minimales utilisées dans la méthode du calcul CFR pour la délimitation des périmètres de protection (krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001)	<b>75</b>
<b>5.4</b>	Les grandeurs et les formules correspondantes	<b>78</b>
<b>6.1</b>	Les températures et les précipitations de la zone d'étude	<b>81</b>
<b>6.2</b>	Les forages de la région de Bekkaria (source :l'hydraulique de Tébessa )	<b>84</b>
<b>7.1</b>	Estimation de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de thornthwaite	<b>97</b>
<b>7.2</b>	Estimation de l'évapotranspiration réelle par la méthode de Turc	<b>98</b>
<b>7.3</b>	Application de la méthode CFR	<b>100</b>
<b>7.4</b>	Application de la méthode Wyssling	<b>101</b>
<b>7.5</b>	Application de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira	<b>102</b>
<b>7.6</b>	Application de la méthode d'infiltration	<b>102</b>
<b>7.7</b>	Récapitulatif des résultats	<b>103</b>

---

# Listes Des Figures

## Listes des Figures

### Listes des figures :

Figure	Titre	Page
<b>A</b>	Les zones de protection	<b>3</b>
<b>1.1</b>	L'eau dans l'aquifère	<b>5</b>
<b>1.2</b>	Présentation des eaux souterraines	<b>6</b>
<b>1.3</b>	Limites de l'aquifère	<b>7</b>
<b>1.4</b>	L'infiltration de l'eau dans le sol	<b>7</b>
<b>1.5</b>	Aquifère à nappe libre	<b>8</b>
<b>1.6</b>	Aquifère à nappe captive (seconde nappe depuis la surface du sol, indiquée par la flèche )	<b>9</b>
<b>1.7</b>	Aquifère à nappe perchée (première nappe depuis la surface du sol, indiqué par la flèche )	<b>9</b>
<b>1.8</b>	Gradient de charge hydraulique	<b>11</b>
<b>1.9</b>	La porosité	<b>12</b>
<b>1.10</b>	Porosités hydrogéologiques	<b>13</b>
<b>1.11</b>	La porosité totale et la porosité effective	<b>14</b>
<b>1.12</b>	Influence de la texture sur la perméabilité	<b>15</b>
<b>1.13</b>	Perméabilité de certain sols	<b>15</b>
<b>1.14</b>	Variation de charge et volume d'eau libérée	<b>17</b>
<b>2.1</b>	Illustration d'un forage-captage	<b>18</b>
<b>2.2</b>	Schéma type d'un forage profond réalisé dans les règles de l'art et d'un forage défectueux	<b>19</b>
<b>2.3</b>	Coupe technique d'un ouvrage profond type	<b>20</b>
<b>2.4</b>	Schéma d'un essai de pompage	<b>22</b>
<b>2.5</b>	Cône de rabattement et rayon d'influence	<b>24</b>
<b>2.6</b>	Représentation schématique du rayon d'influence, lors d'un pompage	<b>25</b>
<b>3.1</b>	Typologie et origines de la pollution des eaux souterraines	<b>30</b>
<b>3.2</b>	Distance obligatoire entre assainissement non collectif et un ouvrage de captage d'eau	<b>31</b>
<b>3.3</b>	Infiltration des agents pathogènes	<b>32</b>
<b>3.4</b>	Migration des agents pathogènes dans un puits peu profond, mal construit et détérioré	<b>33</b>
<b>3.5</b>	Aquifère non confiné avant le pompage	<b>33</b>
<b>3.6</b>	Influence du pompage sur la nappe phréatique dans un aquifère non confiné	<b>34</b>

## Listes des Figures

<b>3.7</b>	Schéma de la contamination des eaux souterraines	<b>35</b>
<b>3.8</b>	Pollution d'une nappe – cas d'une pollution liée à une ou plusieurs substances solubles (panache violet présent sur les 2/3 de la nappe )	<b>37</b>
<b>3.9</b>	Effet du gradient hydraulique et des hétérogénéités sur la propagation d'une pollution dans un aquifère alluvial (cas d'un milieu poreux )	<b>38</b>
<b>4.1</b>	Schématisation des aires de protection d'un site de prélèvement d'eau souterraine de catégorie	<b>39</b>
<b>4.2</b>	Périmètre de protection de captage d'eau souterraine	<b>40</b>
<b>4.3</b>	La zone d'appel et du tracé des isochrones	<b>41</b>
<b>4.4</b>	Aire d'alimentation de captage	<b>42</b>
<b>4.5</b>	Les zones de prévention réglementée	<b>42</b>
<b>5.1</b>	Différentes zones autour d'un ouvrage de captage d'eau souterraine	<b>58</b>
<b>5.2</b>	Délimitation des aires de protection par rayon fixe arbitraires A) les aires de protection intermédiaires et les aires de protection immédiates B) l'aire de protection éloignée	<b>61</b>
<b>5.3</b>	Couches aquifères cylindriques limitées par les isochrones (Beach, 2001)	<b>63</b>
<b>5.4</b>	Illustration des trois valeurs à utiliser dans les équations volumétriques pour la détermination du rayon. (Ohio EPA,1994)	<b>63</b>
<b>5.5</b>	La délimitation des aires de protection par rayon fixe calculé par l'équation du cylindre	<b>66</b>
<b>5.6</b>	La délimitation des aires de protection par méthodes analytiques pour les aires de protection intermédiaires et éloignée	<b>69</b>
<b>5.7</b>	Représentation de l'aire d'alimentation et des isochrones déterminées	<b>70</b>
<b>5.8</b>	La délimitation de l'aire d'alimentation par traçage inverse d'une particule d'eau depuis l'installation de prélèvement jusqu'à la limite amont de l'aire d'alimentation	<b>71</b>
<b>5.9</b>	Zone de protection intermédiaire dans des situations extrêmes du gradient hydraulique	<b>74</b>
<b>5.10</b>	Illustration de la méthode de Wyssling	<b>76</b>
<b>6.1</b>	La zone d'étude Bekkaria	<b>79</b>
<b>6.2</b>	Variation interannuelle de la température	<b>81</b>
<b>6.3</b>	Variation interannuelle des précipitations	<b>82</b>
<b>6.4</b>	La carte piézométrique de la nappe de Tébessa (juin 2017)	<b>83</b>

## Listes des Figures

---

---

<b>6.5</b>	La carte de transmissivité ( $\times 10^{-3}$ ) ( chikha –Debbbar .2017 )	<b>83</b>
<b>6.6</b>	La carte de perméabilité ( $\times 10^{-5}$ ) (chikha-Debbbar. 2017)	<b>84</b>
<b>6.7</b>	Forage N°1 /FA2bis	<b>85</b>
<b>6.8</b>	Forage N°2 /V4	<b>86</b>
<b>6.9</b>	Forage N°3 /X2	<b>87</b>
<b>6.10</b>	Forage N°4 / FA5	<b>88</b>
<b>7.1</b>	Bilan Hydrologique d'un Bassin Versant	<b>90</b>

---

---

**INTRODUCTION**

**Et**

**Objectifs Visés**

### Introduction et objectifs visés

En raison de la croissance économique et démographique de l'Algérie, la demande en eau potable ne cesse de croître. A cela s'ajoute que les effets du changement climatique risquent de perturber les précipitations annuelles ce qui peut entraîner des variations dans les quantités d'eau disponible. De plus, certaines villes sont entièrement dépendantes de l'eau issue de captages souterrains. La sécurisation et la protection des captages est donc un enjeu d'importance capitale, voire même indispensable.

Les eaux souterraines exploitées à partir des ouvrages de captages à proximité desquels s'exercent plusieurs activités anthropiques pouvant constituer d'importants foyers de pollution. L'utilisation des sols, liée aux activités urbaines, agricoles et industrielles, a contribué à l'augmentation du potentiel de contamination des eaux souterraines.

Le plus important risque d'affectation de la qualité des eaux souterraines est l'utilisation des engrais et fertilisants agricoles (azote / nitrates, ...) ainsi que des pesticides (produits phytosanitaires).

Ces risques proviennent de pratiques agricoles non respectueuses des besoins de préservation des eaux souterraines, ainsi que de sources domestiques et publiques (p.ex. : pratiques d'entretien de routes, de zones urbaines, ou encore de jardins privés).

Une contamination de cette ressource naturelle peut persister pendant une dizaine d'années, voire être irréversible selon l'envergure de la pollution. Du fait de la durée de persistance des polluants dans nos réserves d'eau, il est préférable d'appliquer le principe du „mieux vaut prévenir que guérir. Les substances nocives, dès qu'elles se trouvent dans l'eau, doivent être soumises à des traitements complexes et coûteux pour être enlevées ou neutralisées, si faire se peut.

La réalisation de forages afin de capter l'eau représente également un risque de contamination des nappes si certaines prescriptions techniques ne sont pas respectées. Cela concerne les captages de grands volumes (pour l'industrie ou l'agriculture notamment), mais aussi les petits forages (appelés « puits ») réalisés par les particuliers pour l'alimentation locale en eau. Lors de la réalisation de ces forages, le respect des prescriptions techniques contribue à préserver la qualité des nappes. Afin de préserver la qualité naturelle de nos réserves d'eaux souterraines, il convient de mettre en œuvre un concept global de protection, accompagné d'un programme de mesures adaptées.

## Introduction et objectifs visés

---

La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur de périmètres de protection déterminés autour des ouvrages de captage constitue un moyen efficace pour la préservation de la qualité de ces ouvrages.

Un approvisionnement durable en eau potable pourra être garanti en mettant en œuvre un **périmètre de protection** suffisant autour des captages (zones de protection), en combinaison avec un programme de mesures appropriées telles que des interdictions ou des restrictions d'utilisation en vue de protéger la ressource d'eau souterraine.

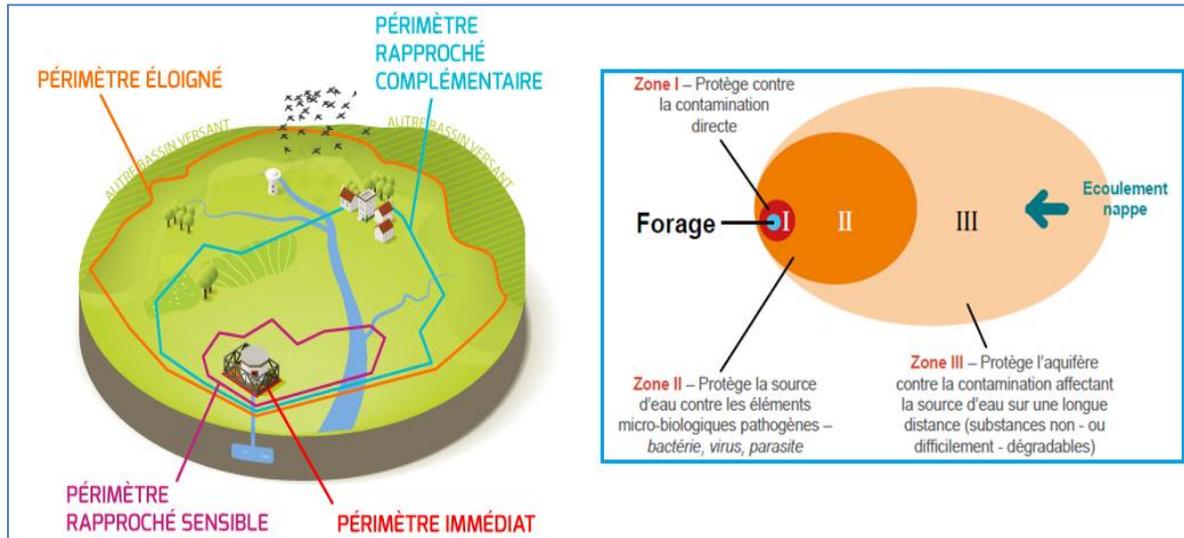
En règle générale, les zones de protection des eaux englobent l'intégralité des bassins d'alimentation des captages d'eau souterraine (sources, forages).

Le dimensionnement des zones de protection dépend du volume de production d'eau captage, de la protection naturelle du sous-sol géologique et des sols, du degré de fracturation de la roche, ainsi que des vitesses d'écoulement de l'eau souterraine.

Le périmètre de protection a pour but principal la lutte contre les pollutions ponctuelles, qu'elles soient chroniques ou accidentelles, en éloignant les sources potentielles de ces pollutions des points de captage.

Cette protection d'un captage se compose en fait de trois périmètres-gigognes, déterminés selon les risques de pollution et la vulnérabilité du captage. On distingue ainsi trois zones (Figure A) :

- ➡ Un périmètre de protection **immédiate** autour du point de prélèvement, dont les terrains sont à acquérir en pleine propriété,
- ➡ Un périmètre de protection **rapprochée** à l'intérieur duquel peuvent être interdites ou réglementées toutes activités ou installations portant atteinte directement ou non à la qualité des eaux,
- ➡ Un périmètre de protection **éloignée**, à l'intérieur duquel les activités et installations peuvent être réglementées.



**Figure (A) : les zones de protection**

La protection la plus répandue à travers le monde contient le zonage suivant :

- ▶ **Zone I** : Protection immédiate, contre une dégradation physique ou une introduction directe de polluants dans le captage (10 à 30 m depuis l'ouvrage de captage).
- ▶ **Zone II** : Protection rapprochée, contre une pollution bactériale ou virale (définie par un temps de transit d'environ 50 jours pour aller jusqu'à l'ouvrage de captage, avec une distance d'au minimum 50 m depuis l'ouvrage).
- ▶ **Zone III** : Protection éloignée, contre les polluants persistants (généralement délimitée par la totalité du bassin d'alimentation).

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. D'une manière générale, le concept actuel des zones de protection des eaux souterraines est basé sur les paramètres suivants : temps de transit (à cause des germes) et distance depuis l'ouvrage de captage. Plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise.

L'importance d'un dimensionnement adéquat des PDP est cruciale.

En effet, si le PDP ne couvre pas suffisamment la zone à protéger, une contamination de l'ouvrage de captage peut être appréhendée.

A l'opposé, si le PDP englobe une trop grande portion du territoire, la gestion optimale de cette zone peut être difficilement assurable.

Ainsi, la principale problématique dans l'établissement des PDP consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination plus réaliste des périmètres pour un minimum d'informations et d'expertise.

## Introduction et objectifs visés

---

La présente étude expose une méthodologie focalisée sur les captages. Contrairement à l'approche qualitative habituelle, basée sur une cotation de la vulnérabilité, il s'agit d'une approche quantitative du cheminement de l'eau, qui regroupe des aspects hydrologiques, pédologiques et hydrogéologiques.

Pour cette raison les trois premiers chapitres ont été consacré à un rappel sur l'eau souterraine, une présentation des ouvrages de captage, et enfin l'illustration de la pollution. Après la description de la zone de protection des forages et la présentation de la réglementation mondiale et algérienne régissant les zones de protection, un examen des méthodes appliquées pour définir les zones de protection des forages dans l'étude de cas est présenté.

La zone d'étude est brièvement décrite, y compris les forages utilisés pour l'approvisionnement public en eau, et des méthodes analytiques pour la définition de la zone de protection sont appliquées.

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la région Bekkaria (dite Ain El Khanga) a été réalisée à partir de quatre méthodes.

Il s'agit de la méthode CFR, de la méthode d'infiltration, de la méthode de Wyssling et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Le rayon du PPI a été fixé à 30 m selon la méthode CFR. Cette valeur est supérieure à celle exigée dans les pays comme la France, l'Allemagne et la Suisse (entre 10 m et 20 m) mais équivalent de celle appliquée aux Etats-Unis (30 m).

Enfin, quelques conclusions sont tirées, sur la base des résultats obtenus

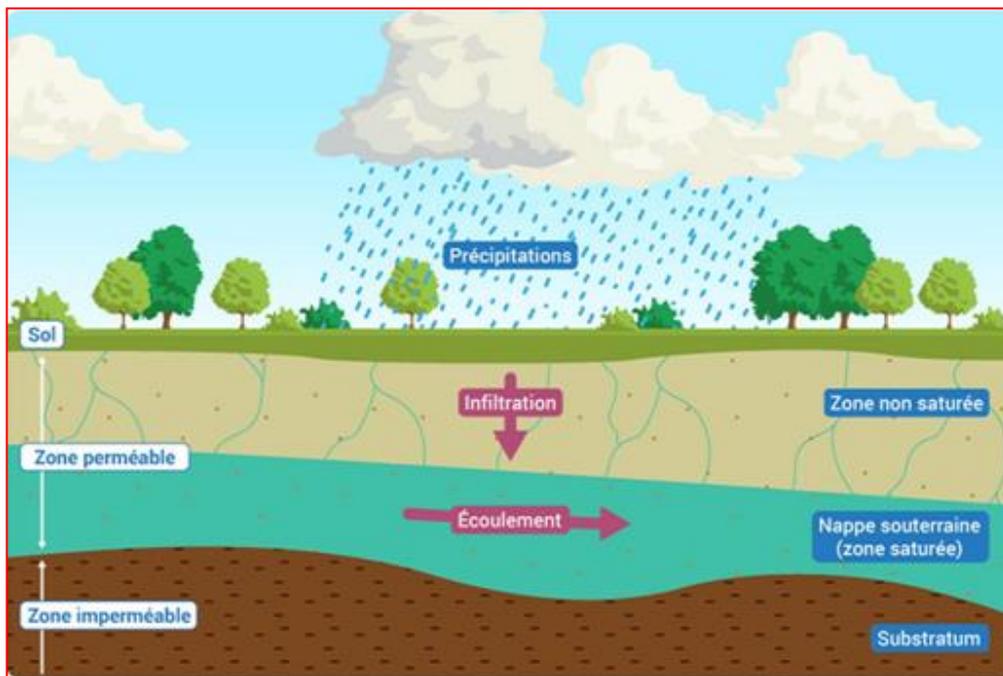
**Chapitre I :**  
**Les eaux**  
**souterraines,**  
**Les nappes**  
**et les**  
**aquifères**

## Chapitres 1 : Les eaux souterraines, les nappes et les aquifères

### 1.1 Introduction

Les eaux souterraines regroupent l'ensemble des réserves d'eau qui se trouvent dans le sous-sol. L'eau est stockée dans des zones appelées aquifères, composées des roches poreuses et/ou fissurées. L'eau peut s'accumuler dans ces espaces vides pour former des nappes, qui occupent tout ou partie de l'aquifère.

La profondeur des nappes est variable : les plus profondes peuvent se trouver à plusieurs centaines de mètres sous la surface. Les nappes phréatiques sont celles qui se trouvent près de la surface. Leur faible profondeur les rend facilement accessibles pour les activités humaines. Quand la pluie tombe sur le sol, une partie coule le long de la surface de la terre vers des ruisseaux, rivières ou des lacs et peut hydrater le sol. Une partie de cette eau est utilisée par la végétation, une autre partie s'évapore et retourne à l'atmosphère. Une partie de l'eau s'infiltre aussi dans le sol, traverse la zone non saturée et atteint la nappe phréatique, ce qui est une surface imaginaire où le sol est saturé en dessous (**figure 1.1**)



**Figure (1.1) : L'eau dans l'aquifère**

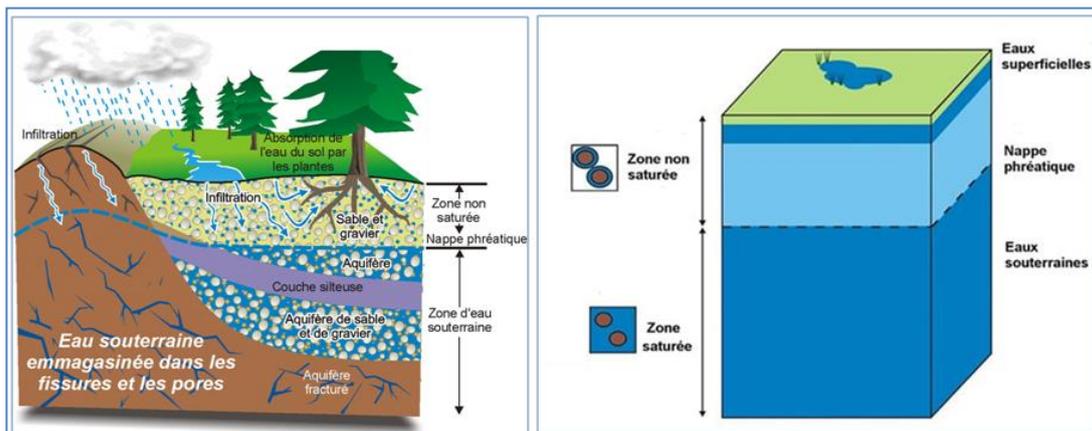
Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol. Elles transitent plus ou moins rapidement (jour, mois, année, siècle, millénaire) dans les fissures et les pores en milieu saturé ou non. Elles

représentent environ 30% des ressources en eau douce de la planète. Ces eaux emplissent les cavités naturelles du sous-sol de manière continue et s'écoulent uniquement par gravité. Ces eaux se caractérisent par une turbidité faible puisqu'elles bénéficient de filtration naturelle importante, et par une contamination bactérienne faible, car elles sont à l'abri des sources de pollution.

La dureté est souvent élevée, et les eaux souterraines peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents comme le calcium. En plus, dans les eaux souterraines, le fer et le magnésium présentent une concentration élevée (Degremont, 2005).

Le niveau de l'eau souterraine, au-dessous duquel les roches ou sédiments sont saturés, est appelé nappe phréatique (**Figure 1.2**).

On trouve aussi de l'eau au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone non saturée, par exemple sous forme d'eau du sol, mais cette eau n'est normalement pas exploitée par l'homme et on ne pas la considérée comme une eau souterraine (Ayad, 2017).



**Figure (1.2): Présentation des eaux souterraines**

### 1.2 Les aquifères

Un aquifère est un réservoir d'eau souterrain (**Figure 1.3**), suffisamment poreux et suffisamment perméable pour être considéré comme une réserve exploitable par l'homme. Il contient une nappe d'eaux douces.

L'aquifère est donc le contenant et la nappe le contenu. Le schéma ci-dessous présente les différentes limites d'un aquifère. D'une manière générale, on distinguera :

- ▶ La présence physique d'une limite inférieure constituée d'un matériau moins perméable que le matériau constituant l'aquifère, appelé encore substratum, cette limite est imperméable ;
- ▶ Une limite supérieure dont la nature dépendra du type de nappes. Elle sera perméable et confondue à la surface piézométrique pour les aquifères libres alors qu'elle est imperméable et en dessous de la surface piézométrique pour les aquifères confinés.

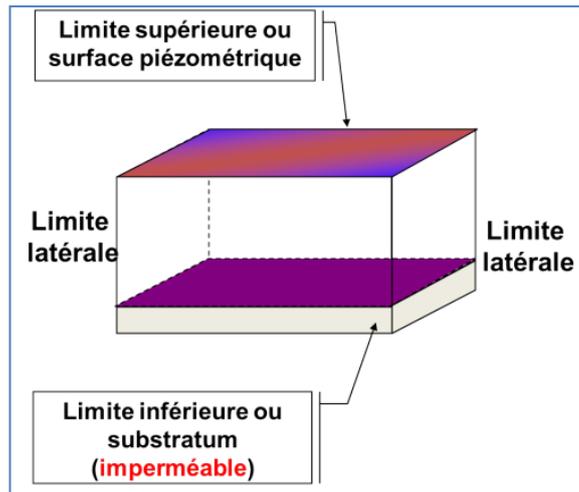


Figure (1.3) : Limites de l'aquifère

L'eau contenue dans une nappe souterraine provient de l'infiltration des eaux de surface (c'est le cas le plus courant). L'eau des rivières, des lacs ou des pluies s'infiltrer vers le bas dans le sol tant que celui-ci la laisse passer. Mais lorsque qu'il y a une couche imperméable, comme de l'argile ou de la roche continue, l'eau s'accumule et forme une nappe, qui s'étale sur les côtés. Certaines nappes se sont infiltrées très loin, et ont longtemps circulé dans le sol avant de s'accumuler.

À cause de tels détours (Figure 1.4) elle peut se retrouver « coincée » entre une couche imperméable en bas, le *plancher de la nappe*, et une autre au-dessus d'elle à l'endroit où elle a fini par s'accumuler, qui constitue le *plafond de la nappe*. C'est alors une *nappe captive*

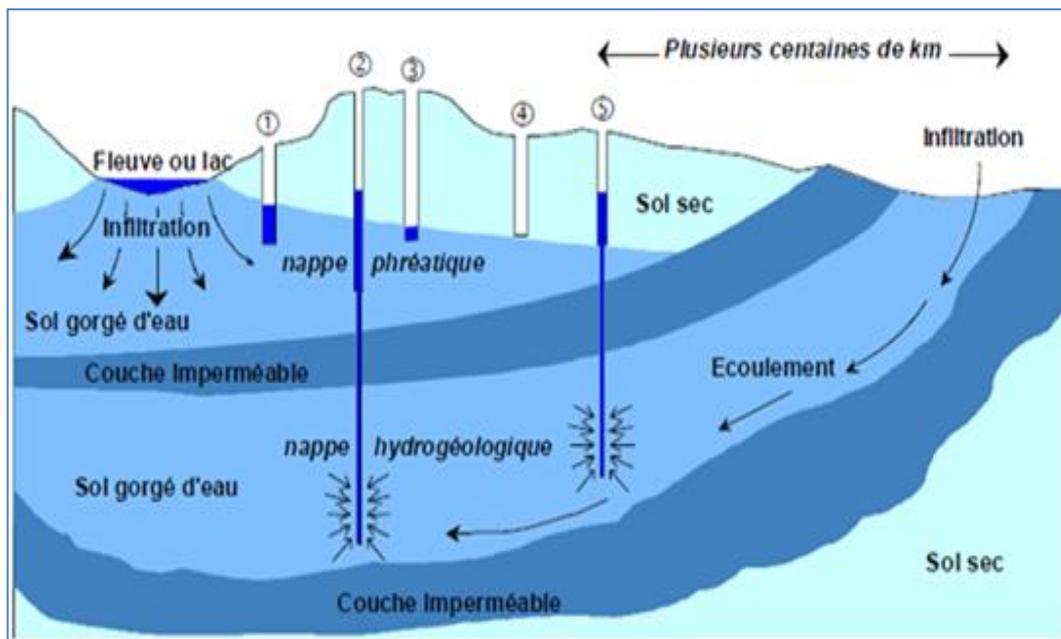


Figure (1.4) : l'infiltration de l'eau dans le sol

La figure ci-dessus rassemble plusieurs exemples de nappes. La plus proche de la surface est appelée nappe phréatique, elle est alimentée assez directement par les eaux de surface, son niveau varie donc en relation étroite avec les pluies ou l'éloignement par rapport au fleuve ou au lac. Cette nappe est assez proche du sol pour qu'une partie de la végétation y plonge ses racines, et pour qu'on puisse l'exploiter en creusant des puits.

Du fait de sa proximité avec la surface, cette eau est souvent d'une qualité médiocre ou en tout cas irrégulière, puisqu'elle s'infiltré en traversant un sol souillé (déchets, excréments d'animaux et que des puits creusés dans cette nappe sont des portes ouvertes à d'autres pollutions (cordes de puisage qui ont traîné par terre avant de tremper dans l'eau, chute d'animaux, de végétation...).

Il existe souvent d'autres nappes que l'on rencontre plus en profondeur, ce sont **les nappes profondes**.

Au contraire **des nappes phréatiques**, elles ne sont pas atteintes par les racines de la végétation, et elles ne sont que très peu ou très lentement influencées par les pluies.

### 1.2.1 Aquifère à nappe libre

Un aquifère à nappe libre (**figure 1.5**) est une nappe souterraine dont la surface supérieure est à pression atmosphérique : c'est la surface piézométrique. Le niveau de l'eau dans un forage indique la surface piézométrique ou surface à pression atmosphérique. Nappe dont la surface piézométrique est à la pression atmosphérique (surface libre). Le niveau de cette nappe peut fluctuer dans la zone de battement qui, suivant la période, peut être saturée ou non saturée.

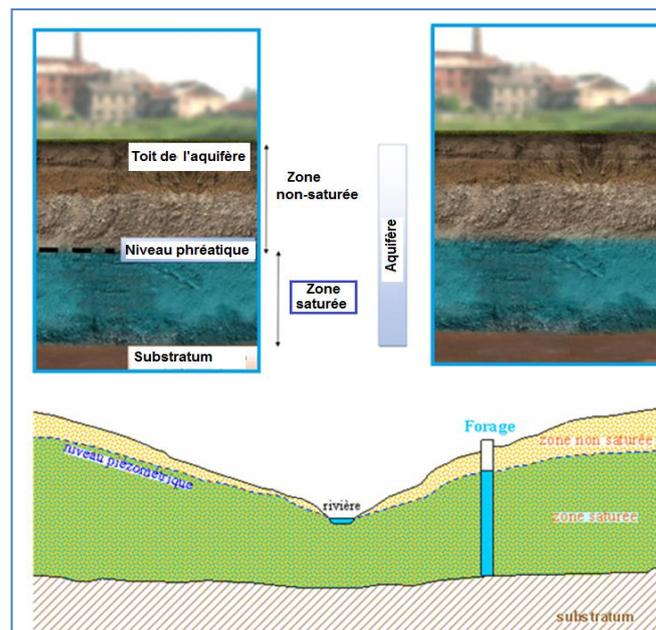
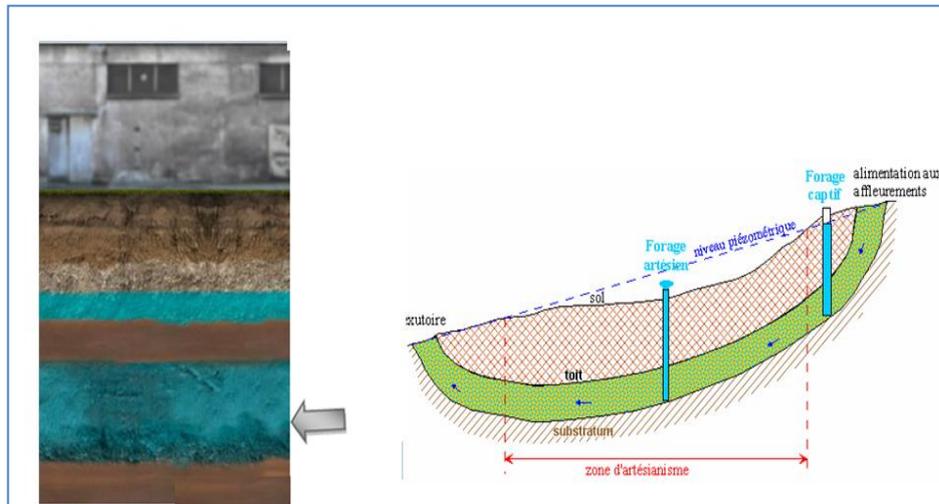


Figure (1.5): Aquifère à nappe libre

### 1.2.2 Nappe captive

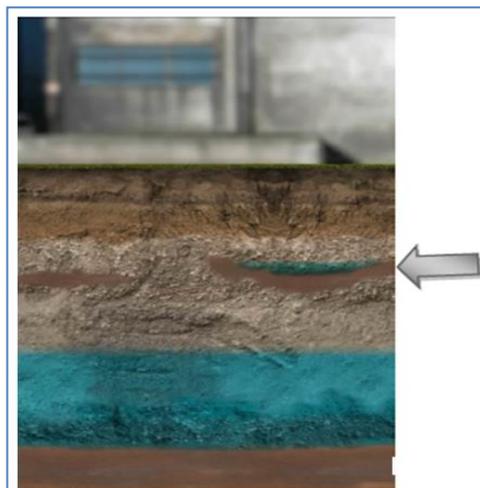
La nappe captive (**Figure 1.6**) est une nappe ou partie d'une nappe soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure à la cote du toit de l'aquifère, à couverture moins perméable, qui la contient. Selon les conditions morphologiques et géologiques, une nappe peut être libre (système aquifère « libre »), captive (système aquifère « captif »), être libre puis devenir captive ou inversement être captive puis devenir localement libre par dénoyage de l'aquifère (cf. pompages intenses).



**Figure (1.6): Aquifère à nappe captive (seconde nappe depuis la surface du sol, indiquée par la flèche).**

### 1.2.3 Nappe d'eau perchée

La nappe perchée (**Figure 1.7**) est une masse isolée d'eau souterraine limitée latéralement et verticalement, localisée dans la zone non saturée recouvrant une masse d'eau souterraine beaucoup plus importante.



**Figure (1.7) : Aquifère à nappe perchée (première nappe depuis la surface du sol, indiquée par la flèche)**

### 1.3 les propriétés hydrauliques

Les paramètres hydrodynamiques déduits sont utilisés pour de nombreuses applications pratiques :

- Le dimensionnement d'un ouvrage de captage des eaux souterraines (captage AEP , industriel, forage d'irrigation, géothermie, etc.) ;
- L'évaluation de l'incidence d'un forage sur les eaux souterraines, les ouvrages alentours ;
- L'évaluation de l'incidence d'un forage sur les eaux de surface ;
- La simulation du niveau des nappes dans les modèles numériques d'écoulement souterrain et de transport ;
- D'une manière générale, à établir les impacts des ouvrages d'exploitation, les interférences entre ouvrages et avec le milieu naturel, le potentiel exploitable des eaux souterraines.

Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emménagement 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 pompage.

L'eau souterraine remplit les porosités du milieu géologique, c'est-à-dire les fractures et les espaces entre les grains, que ce soit dans les dépôts meubles ou dans le roc. Plus la porosité du milieu géologique est élevée, plus il y a d'espace disponible pour emmagasiner de l'eau dans ce qui constitue l'aquifère.

Pour qu'une unité géologique soit intéressante pour l'approvisionnement en eau souterraine, il faut aussi que cette eau se renouvelle, c'est-à-dire qu'il faut que les vides communiquent entre eux pour que l'eau puisse circuler d'un endroit à un autre. Pour évaluer si le contenant qu'est le milieu géologique constitue un bon aquifère, il faut connaître sa porosité et son degré de fracturation.

Pour définir la capacité d'une formation géologique à transmettre l'eau rapidement d'un vide à l'autre, il faut mesurer sa conductivité hydraulique.

Plus cette dernière est élevée et plus l'aquifère est productif. Il est possible de mesurer la conductivité hydraulique (K) du milieu par différents essais réalisés dans les trous de forages (obturateurs, injection, pompage, etc.).

Les propriétés hydrauliques permettent d'analyser de façon quantitative l'aptitude d'une formation géologique à contenir de l'eau et à la laisser circuler. Elles dépendent à la fois des propriétés du fluide, en l'occurrence l'eau, et des propriétés physiques du milieu permettant l'emménagement et l'écoulement de l'eau.

Les hydrogéologues effectuent des essais hydrauliques (par exemple, des essais de pompage dans des puits), pour mesurer plusieurs paramètres tels que **la conductivité hydraulique (K)**, **la transmissivité (T)**, **le coefficient d'emmagasinement (S)** et **la capacité spécifique**.

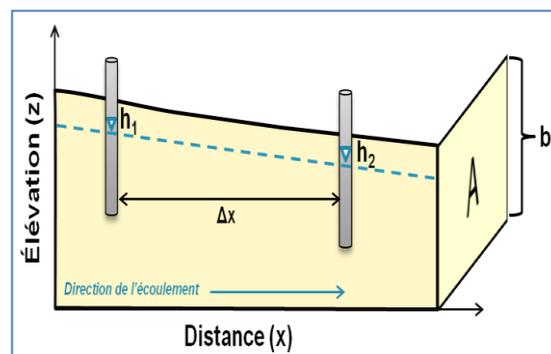
Le suivi du rabattement et de la remontée du niveau piézométrique dans un puits de pompage et dans des puits d'observations pendant et après le pompage permet de caractériser l'aquifère. On doit notamment établir le temps nécessaire après l'arrêt du pompage pour que le système revienne à son équilibre, par exemple pour que le niveau piézométrique retourne à sa valeur initiale, que l'on appelle le niveau statique.

La mesure de la différence de charge hydraulique entre deux points alignés dans la direction de l'écoulement permet d'estimer les gradients de charge hydraulique ( $i$ ), soit la différence de charge hydraulique divisée par la distance entre les deux points ( $\Delta x$ ) (**Figure 1.8**). Connaissant ce gradient et la conductivité hydraulique de l'aquifère, on peut alors estimer la quantité d'eau souterraine qui circule dans le sous-sol, c.à.d. le **débit (Q: L<sup>3</sup>/t)**.

$$i = \frac{(h_1 - h_2)}{\Delta x} \quad \text{et} \quad Q = K A i \quad (1.1)$$

Avec:

- ▶  $h$  = niveau piézométrique ou charge hydraulique {L}
- ▶  $i$  = gradient de charge hydraulique {sans unité}
- ▶  $\Delta x$  = distance entre les 2 puits {L}
- ▶  $Q$  = débit {L<sup>3</sup>/t}
- ▶  $K$  = conductivité hydraulique {L/t}
- ▶  $A$  = aire de la surface traversée {L<sup>2</sup>}



**Figure 1.8. Gradient de charge hydraulique**

La vitesse effective de l'eau dans les formations poreuses saturées est déterminée par l'équation suivante :

$$v_e = \frac{ki}{n_e} \quad (1.2)$$

Avec:

- ▶  $v_e$  : vitesse effective
- ▶  $K$ : conductivité hydraulique
- ▶  $i$  : gradient hydraulique (variation de charge hydraulique entre deux points de mesure,

$$i = \frac{(h_1 - h_2)}{\Delta x} \quad (1.3)$$

- ▶  $n_e$  : porosité efficace

Lorsqu'il s'agira de contrôler l'absence d'impact en direction d'un enjeu, le temps de transfert «t» entre le forage de contrôle et l'enjeu, séparés par une distance «d», est estimé de la manière suivante :

$$t = d/v_e \quad (1.4)$$

Avec:

- ▶  $t$  : temps de transfert
- ▶  $d$  : distance entre le forage de contrôle et l'enjeu

### 1.3.1 La porosité :

Propriété d'un milieu de comporter des vides interconnectés ou non exprimée quantitativement par le rapport du volume des vides sur le volume total du milieu (**figure 1.9**). 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%) (**Figure 1.9**). La porosité totale ne dépend pas de la taille des grains mais diminue avec l'hétérogénéité des grains.

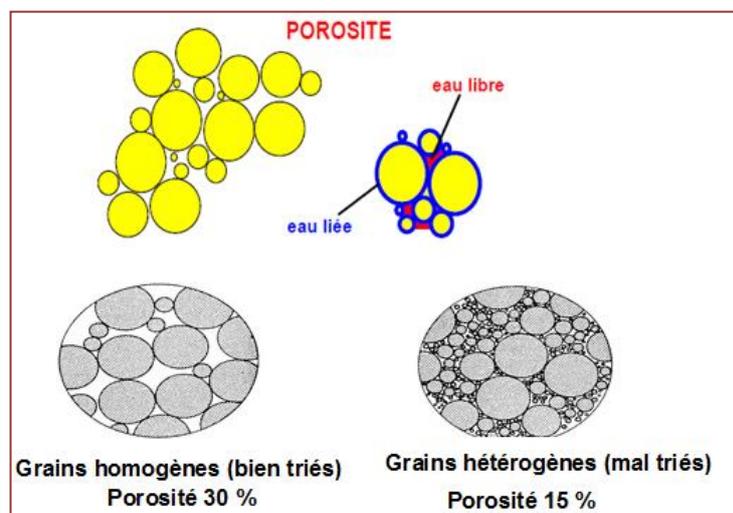


Figure (1.9) : la porosité

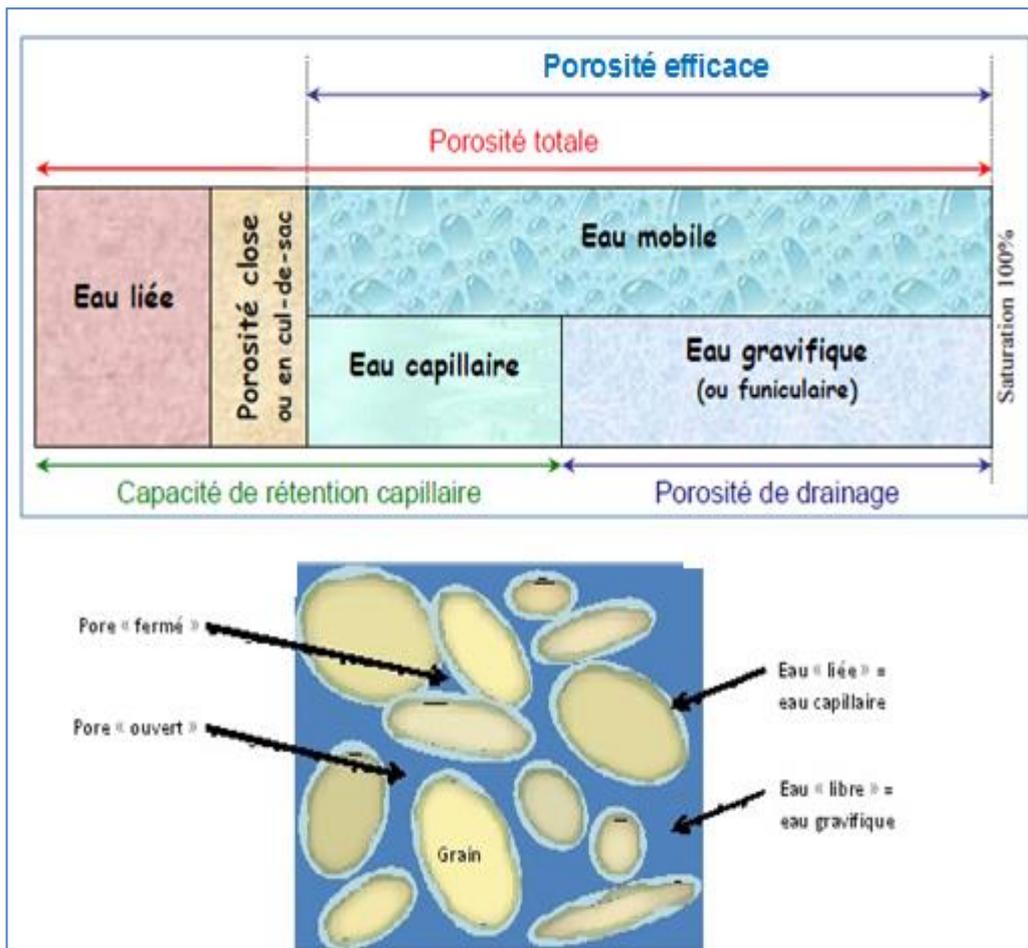
La porosité totale ou absolue est le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche C'est un nombre sans unité exprimé en % :

$$n(\text{porosité totale}) = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} \quad (1.5)$$

L'eau liée, attachée à la surface des grains, ne participe pas à l'écoulement de même que l'eau située dans des pores non connectés (porosité close) ou mal connectés (pores en culs-de-sac). On définit alors en milieu saturé une porosité efficace (*effective porosity* en anglais) comme le rapport du volume d'eau qui peut circuler sur le volume total de roche (**Figure 1-10**).

Cette porosité correspond en fait au rapport entre la vitesse moyenne de l'eau (mesurée par traçage par exemple) et la vitesse fictive déduite de la loi de Darcy :

$$n_e = \frac{\text{Volume d'eau qui peut circuler}}{\text{Volume total}} = \frac{\text{vitesse de Darcy}}{\text{Vitesse de l'eau}} \quad (1.6)$$



**Figure 1-10. Porosités hydrogéologiques**

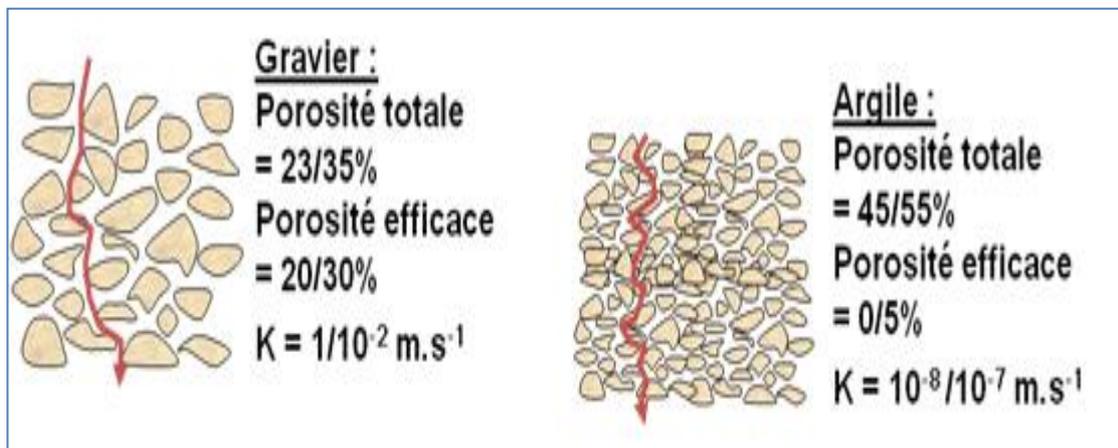
La porosité efficace dépend des caractéristiques texturales de l'aquifère qui sont: le diamètre des grains, l'arrangement des grains et leur état de surface.

Elle diminue avec le diamètre des grains et lorsque la granulométrie n'est pas homogène: en effet, les plus petits grains se logent entre les gros grains et diminuent ainsi les espaces vides. L'arrangement des grains influence également sur la proportion des espaces vides et donc sur la porosité. L'arrangement cubique offre 47,6% d'espaces vides alors que l'arrangement rhomboédrique n'en offre que 25,9%. Ainsi donc **le tableau (1.1)** et **la figure (1.11)** nous montrent quelques exemples de porosité efficace.

On peut voir que les graviers possèdent de forts taux de porosité efficace tandis que ce taux est très faible pour l'argile

**Tableau 1.1 : porosité efficace et porosité totale**

Types de réservoirs	Porosité efficace %	Types de réservoirs	Porosité efficace %
Gravier gros	30	Sable gros + silt	5
Gravier moyen	25	Silt	2
Gravier fin	20	Vases	0.1
Gravier + sable	15 à 25	Calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	Craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0.1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	schistes	0.1 à 2

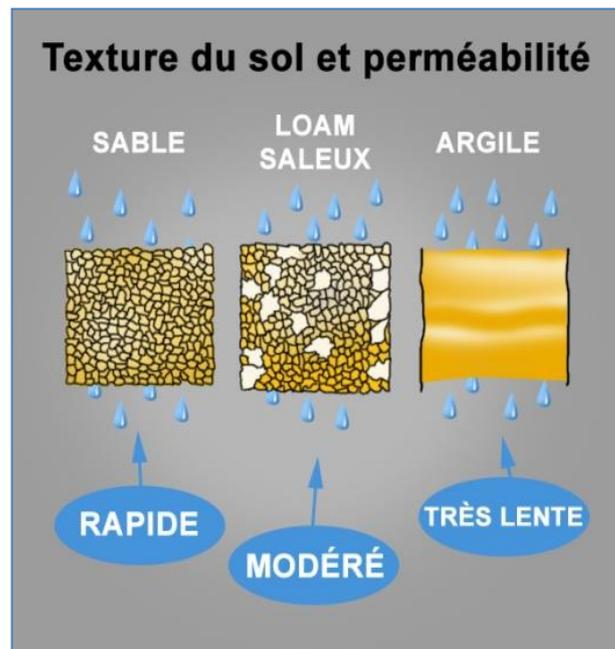


**Figure (1.11) : La porosité totale et la porosité effective**

### 1.3.2 La perméabilité

La perméabilité,  $K$ , est une propriété du matériau : il représente la plus ou moins grande capacité d'un matériau à se laisser traverser par l'eau. Dans la nature, il est possible de trouver une échelle très vaste de valeur de  $K$ .

De façon générale, les roches granulaires non consolidées et les roches fissurées présentent des valeurs élevées de conductivité hydraulique, à l'opposé les roches composées de particules fines (sils, argiles) ou encore les roches cristallines cohérentes montrent des valeurs très faibles (**Figure 1.12**).



**Figure (1.12) : influence de la texture sur la perméabilité**

Les différents types de sol ne présentent pas les mêmes caractéristiques de perméabilité.

**La figure (1.13)**, donne quelques valeurs moyennes du coefficient  $K$  de perméabilité en fonction de la nature de sol.

Classement des roches en fonction de leur perméabilité (Valeurs exprimées en m/s)

Perméabilité $k$ (m/s)	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$
Type de sol	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin, Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène			
Possibilités d'infiltration	excellentes		bonnes		moyennes à faibles			faibles à nulles			

**Figure (1.13) : perméabilité de certains sols**

### 1.3.3 Transmissivité (T) :

La productivité d'un captage dans un aquifère, soit le débit que peut capter un forage, est fonction de son coefficient de perméabilité ( $k$  en m/s) et de son épaisseur mouillée ( $e$ ) :

$$T \left[ \frac{m^2}{s} \right] = k \left[ \frac{m}{s} \right] * e [m] \quad (1.7)$$

Ce paramètre est appelé Transmissivité (T en m<sup>2</sup>/s).

La Transmissivité d'un aquifère représente la capacité d'un aquifère à mobiliser l'eau qu'il contient. Elle se détermine lors de pompages d'essai. Volume d'eau qui peut traverser un prisme d'aquifère sous l'effet d'une différence de charge unitaire (T en m<sup>2</sup>/s).

### 1.2.4 Le coefficient d'emménagement

Le coefficient d'emménagement est défini comme le volume d'eau  $V$  libéré ou emmagasiné à travers une surface  $A$  d'aire égale à l'unité, pour une unité de variation de la charge hydraulique  $\Delta h$  normale à cette surface. Il est désigné par le symbole  $S$ , sans dimension :

$$S = \frac{\Delta V}{A * \Delta h} \quad (1.8)$$

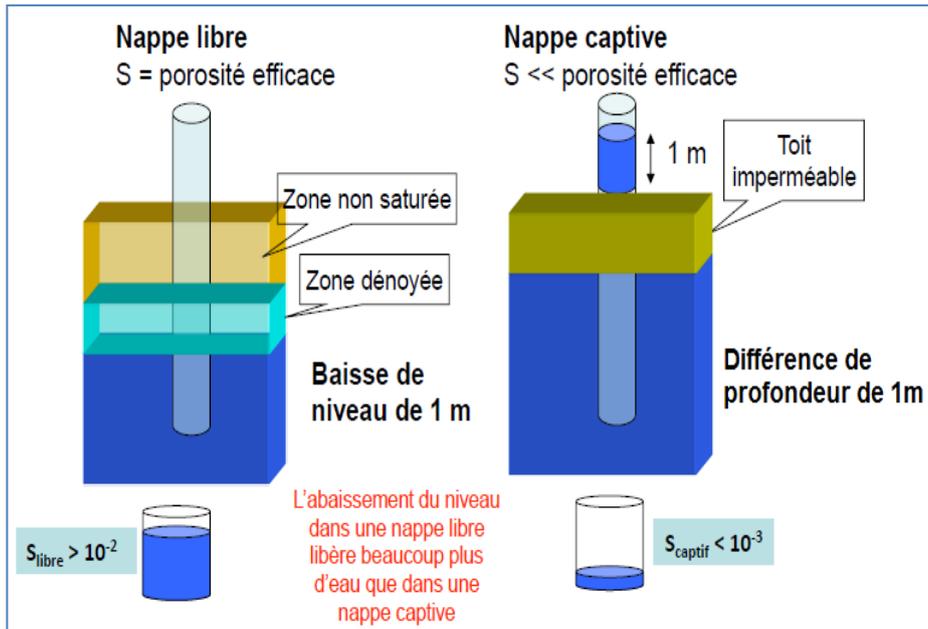
Le coefficient d'emménagement ( $S$ ) représente la quantité d'eau libéré sous une variation unitaire de la charge hydraulique, c'est-à-dire sous l'effet d'une baisse du niveau d'eau.

Il conditionne l'emménagement de l'eau souterraine mobile dans les vides du réservoir. Il est utilisé pour caractériser plus précisément le volume d'eau exploitable par un forage et se détermine lors de pompages d'essai.

Les valeurs usuelles vont de 1% pour certains limons et jusqu'à 30 - 40% pour des alluvions grossières.

La valeur de  $S$  est plus petite dans un aquifère à nappe captive (de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-3}$ ), alors qu'elle est égale à la porosité efficace dans un aquifère à nappe libre (de l'ordre de 1 à 30%) **(Figure 1.14).**

L'emménagement spécifique ( $S_s$ ) est défini comme étant le rapport de  $S$  sur l'épaisseur de l'aquifère. Il est uniquement défini dans un aquifère à nappe captive



**Figure (1.14) : Variation de charge et volume d'eau libérée**

Le coefficient d'emmagasinement est égal, en pratique, à la porosité efficace et sa signification est indépendante du temps. Les valeurs usuelles vont de 1% pour certains limons et jusqu'à 30 - 40% pour des alluvions grossières.

**Chapitre II:**

**Les**

**Ouvrages**

**De**

**captage**

### Chapitre 2 : Les ouvrages de captage :

#### 2.1 Introduction :

Par captage on entend un ouvrage de prélèvement exploitant une ressource en eau, que ce soit en surface (prise d'eau en rivière) ou dans le sous-sol (forage ou puits atteignant un aquifère). Dans le vocabulaire courant le terme de captage fait référence à l'action de prélever une ressource en eau et ne se réfère donc pas à un objet physique identifiable.

Le terme de captage devrait être employé au sens d'un « ouvrage de prélèvement » destiné, dans le cas présent, à l'alimentation en eau potable qu'elle soit individuelle ou collective.

Il existe différentes façons de prélever les eaux souterraines :

- Le captage-source est un ouvrage construit autour d'une résurgence naturelle des eaux souterraines. Les sources sont caractérisées par une ou plusieurs venues d'eau, qui s'écoulent librement au travers, par exemple, de fissures dans une roche perméable ;
- Le forage-captage, contrairement à la source, consiste à réaliser un trou dans le sol, d'un diamètre restreint (généralement compris entre 0,2 et 0,5m) et d'une profondeur pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres et à l'équiper de tubages, par endroits crépines (troués pour laisser passer l'eau), afin de prélever les eaux d'une nappe d'eau souterraine jusqu'à la surface avec une pompe ;
- Le puits a un fonctionnement similaire à celui du forage-captage, mais son diamètre est beaucoup plus gros que celui du forage (parfois plus d'un mètre de diamètre) et sa profondeur ne dépasse que très rarement quelques mètres. Il permet de capter les eaux de nappes phréatiques, peu profondes.

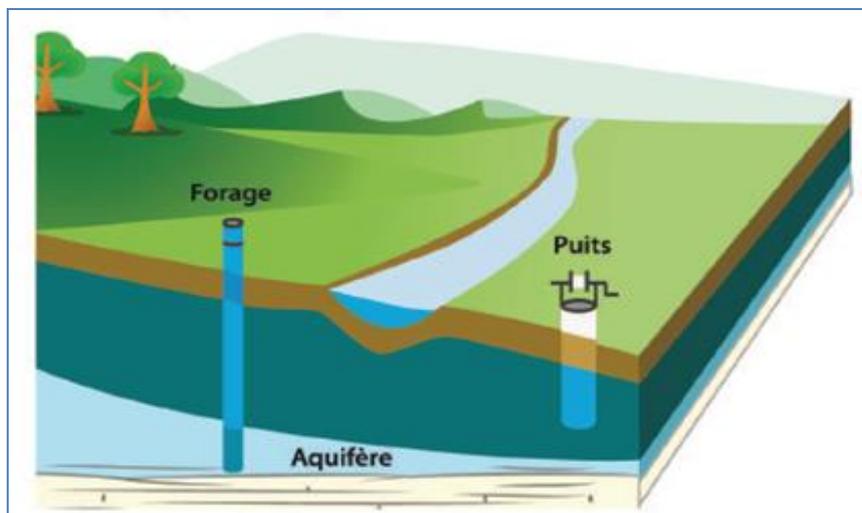


Figure (2.1) : Illustration d'un Forage-captage

### 2.2 Les puits :

Les puits sont des ouvrages creusés manuellement en forme cylindrique généralement à des diamètres variables de 1,50 à 2,5m avec des parois curetées en briques ou en béton ; leur profondeur est de l'ordre de 50 m et peut atteindre exceptionnellement une centaine de mètre. Pour l'exploitation des eaux souterraines à faible profondeur ils offrent l'avantage de faciliter l'entretien et d'abriter plusieurs équipements de pompage.

Un puits est un simple trou creusé dans le sol, communiquant directement avec la nappe la moins profonde (la nappe phréatique) afin de puiser directement dedans avec des moyens simples (cordes et puisettes ou seaux, plus rarement une pompe à motricité humaine ou même une pompe motorisée).

### 2.3 Les forages :

Un forage est un ouvrage technique complexe. De sa qualité de réalisation dépend sa durée de vie et la prévention du transfert de pollutions vers les eaux souterraines.

Un forage est un ouvrage technique complexe dont l'état évolue au fil du temps. Afin de limiter les risques de pollutions des nappes, un forage doit être réalisé dans les règles de l'art

(Figure 2.2).

Il s'agit également d'une garantie de longévité de l'ouvrage en évitant son ensablement ou son colmatage prématuré. Le forage doit permettre d'extraire de l'eau claire, sans matière en suspension visible, et empêcher toute pollution des eaux souterraines à partir des eaux de surface et des eaux peu profondes.

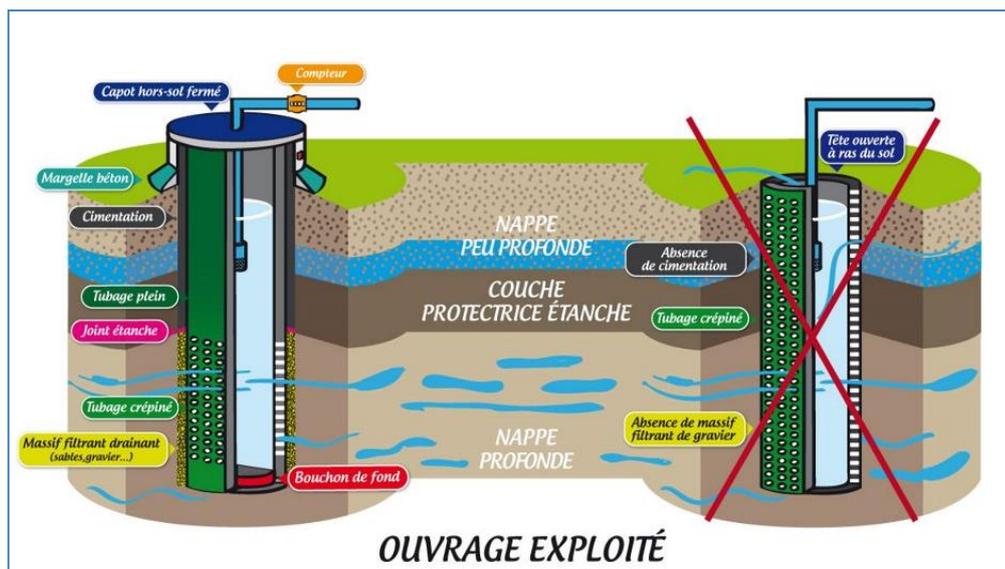


Figure (2.2) : Schéma type d'un forage profond réalisé dans les règles de l'art et d'un forage défectueux

La figure (2.3) représente la coupe technique d'un ouvrage profond type.

Trois éléments sont essentiels :

- Proscrire le « multicrèpinage », c'est-à-dire la pose de Crépines permettant de capter des nappes différentes. Les différentes nappes ne doivent pas être mises en contact.
- Réaliser l'étanchéifiassions de l'espace annulaire au niveau des horizons non captés : c'est la cimentation.
- Réaliser une tête de forage correcte (au-dessus du terrain naturel, avec une dalle béton et un capot fermé).



Figure (2.3) : coupe technique d'un ouvrage profond type

### 2.4 Théorie simplifiée de l'essai par pompage :

Les pompages visent à :

1- Définir les caractéristiques hydrodynamiques d'un ouvrage (débit critique, débit spécifique, pertes de charges, rendement, débit d'exploitation) pour établir les réglages optima de son exploitation (débits, fréquence et temps de pompage, position optimum de la pompe), l'objectif étant de tracer la courbe caractéristique, véritable fiche d'identité de l'ouvrage.

2- Définir les caractéristiques hydrodynamiques d'une nappe d'eau aquifère au voisinage du forage (perméabilité, transmissivité, rayon d'action, coefficient d'emménagement, cône d'influence), moyennant de disposer d'un réseau piézométrique de surveillance associé.

3- Observer l'évolution des paramètres hydrodynamiques d'un ouvrage ou qualitative de la nappe d'eau par renouvellement régulier des pompages d'essais.

La productivité des puits et des forages peut être prouvée par des essais par pompage.

Les essais par pompage sont des tests portant sur la modification du comportement hydrodynamique du complexe nappe aquifère-ouvrage de captage par impulsion provoquée à l'aide d'un pompage à débit constant. Le débit  $c$  est la quantité ou volume d'eau traversant une section donnée par unité de temps.

Un essai de pompage consiste à pomper de l'eau selon certaines règles et à examiner l'influence du pompage sur les niveaux d'eau de l'aquifère. Dans la pratique, un pompage d'essai se déroule successivement en deux parties :

- ▶ **Essai de puits : série de paliers de débits** différents et croissants, d'une durée d'une heure généralement,
- ▶ **Essai de nappe : pompage de « longue durée »**, à débit constant pendant une durée d'un jour à une semaine (dans la plupart des cas).

Pendant les pompages d'essai, les débits et les niveaux d'eau (dans le forage et dans les piézomètres à proximité) sont obligatoirement mesurés. Les pompages d'essai ont lieu à la réalisation du forage, puis ensuite régulièrement, idéalement tous les 3 ans, pour évaluer l'état de vieillissement de l'ouvrage.

Les données acquises sont interprétées selon les lois de l'hydrodynamique. Les moyens de calculs numériques sont maintenant utilisés couramment. Le rabattement peut s'exprimer et se décomposer en deux termes :

$$s = BQ + CQ^2$$

Le premier terme ( $BQ$ ) correspond au rabattement induit par des **pertes de charge linéaires** dues à la circulation de l'eau dans l'aquifère et à proximité du forage.

Le deuxième terme ( $CQ^2$ ) correspond à un rabattement additionnel induit par des **pertes de charge quadratiques**, c'est-à-dire proportionnelles au carré du débit (ou de la vitesse de l'eau).

Elles sont :

- ▶ Provoquées par l'écoulement turbulent dans les crépines et dans le massif de gravier (mis en place dans le trou du forage, entre le tubage et le terrain naturel),

## Chapitre II : Les ouvrages de captage

- ▶ Négligeables dans l'aquifère, mais au-delà d'une certaine valeur, appelée débit critique, elles peuvent devenir prépondérantes et néfastes à proximité immédiate du forage,
- ▶ Dépendantes de l'équipement du captage (un équipement bien conçu réduit les pertes de charge quadratiques).

Il y a quatre buts principaux :

- La détermination de certaines caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage de captage
- La détermination des paramètres hydrodynamiques en particulier la Transmissivité  $T$  et le coefficient d'emmagasinement  $S$  de l'aquifère
- Les études des conditions aux limites, la structure et la géométrie, la drainance et l'hétérogénéité de l'aquifère
- L'observation directe de l'effet de l'exploitation sur la nappe, la prévision de l'évolution du niveau du plan d'eau dans l'ouvrage de captage en fonction des débits pompés, l'évaluation des ressources en eau souterraine exploitable

Il faut éviter de pomper au-delà du débit critique pour au moins 2 raisons :

- Eviter l'augmentation de la dépense énergétique du pompage,
- Éviter les risques de détérioration de l'ouvrage : remaniement du massif de gravier avec perte de son rôle de filtre et venues d'eau turbide, érosion des crépines, usure de la pompe, etc.

Lors de la réalisation d'un ouvrage de captage, on procède à des essais par pompage pour voir de quelle manière l'eau baisse dans l'ouvrage lorsqu'on pompe. Plus on pompe vite (débit grand), plus le niveau dynamique baisse. Si on pompe trop vite, l'eau continue de baisser, sans se stabiliser à un niveau dynamique : on est en train de vider l'ouvrage de captage plus vite qu'il ne se remplit par le bas.

Le prélèvement produit une baisse du niveau piézométrique : cône de rabattement du niveau piézométrique (NP).

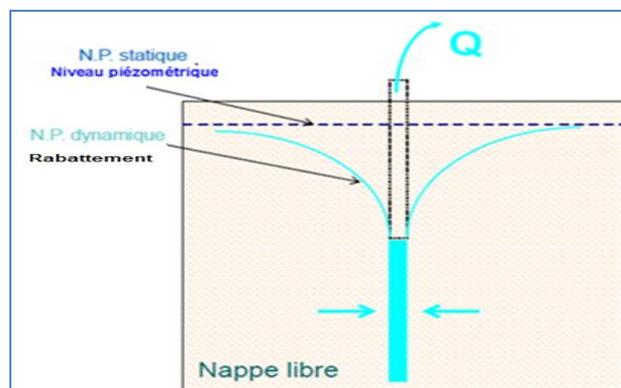


Figure (2.4) : Schéma d'un essai de pompage

Un essai de pompage consiste à suivre le rabattement pendant et après un pompage afin d'évaluer les paramètres de l'aquifère (**Figure 2.4**).

Le rabattement est mesuré dans le puits de pompage et si possible dans un ou plusieurs piézomètres à proximité. Le débit pompé est contrôlé pendant toute la durée de l'essai. L'évolution du rabattement en fonction du temps et du débit pompé permet d'estimer la transmissivité **T** en résolvant de façon analytique l'équation de la diffusivité (**Équation 2.1**). Si un piézomètre d'observation est suivi, alors le coefficient d'emménagement *S* peut aussi être estimé. Dans le cas contraire (c'est-à-dire si le niveau est suivi uniquement dans le puits de pompage), ce ne sera pas possible.

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_y}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q}{T} \quad (2.1)$$

Equation de la diffusivité où

- ▶ *h* est la charge hydraulique (en m),
- ▶ *Q* est le débit (en m<sup>3</sup>/s),
- ▶ *t* est le temps (en s),
- ▶ *T* est la transmissivité (en m<sup>2</sup>/s),
- ▶ *S*(*y*) est le coefficient d'emménagement (sans unité) dans le cas d'un aquifère captif et la porosité de drainage (sans unité) dans le cas d'un aquifère libre.

Les méthodes d'interprétation des essais de pompage reposent en général sur la solution de This (1935). Cette solution s'écrit :

$$h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{avec,} \quad u = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (2.2)$$

Où :

- ▶ *Q* est le débit (en m<sup>3</sup>/s),
- ▶ *T* est le temps (en s),
- ▶ *R* est la distance entre le puits de pompage et le point de mesure (en m),
- ▶ *T* est la transmissivité (en m<sup>2</sup>/s),
- ▶ *S*(*y*) est le coefficient d'emménagement (sans unité) dans le cas d'un aquifère captif et est la porosité de drainage (sans unité) dans le cas d'un aquifère libre.

La solution de This n'est valide que si les conditions suivantes sont respectées :

- ▶ Le milieu poreux est homogène, isotrope et infini ;

- La transmissivité est constante, c'est-à-dire que soit la nappe est captive à épaisseur constante, soit la nappe libre est peu rabattue (rabattement / charge initiale  $< 25\%$ ) ;
- Le puits capte toute la hauteur de l'aquifère et a un diamètre négligeable ;
- Le débit est constant ;
- Il n'y a aucun écoulement transitoire initial.

Si une ou plusieurs de ces conditions ne sont pas remplies des corrections peuvent être apportées. Le pompage modifie le sens d'écoulement de l'eau souterraine, car il crée autour du puits une baisse de pression, ce qui appelle l'eau en direction du puits. Cet écoulement convergent vers le puits affectera l'écoulement souterrain jusqu'à une distance appelée le **rayon d'influence**; jusqu'à cette distance tout autour du puits le niveau de la nappe est influencé selon l'importance du pompage. Le toit de la nappe phréatique s'abaissera en prenant la forme d'un cône que l'on nomme **cône de rabattement** (Figure 2.5).

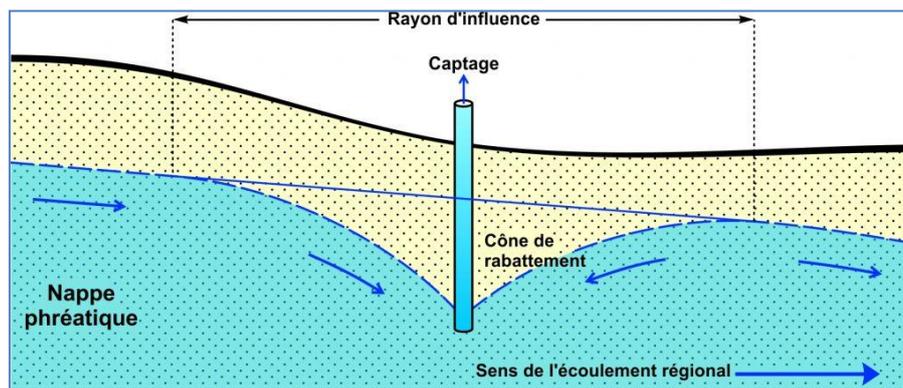
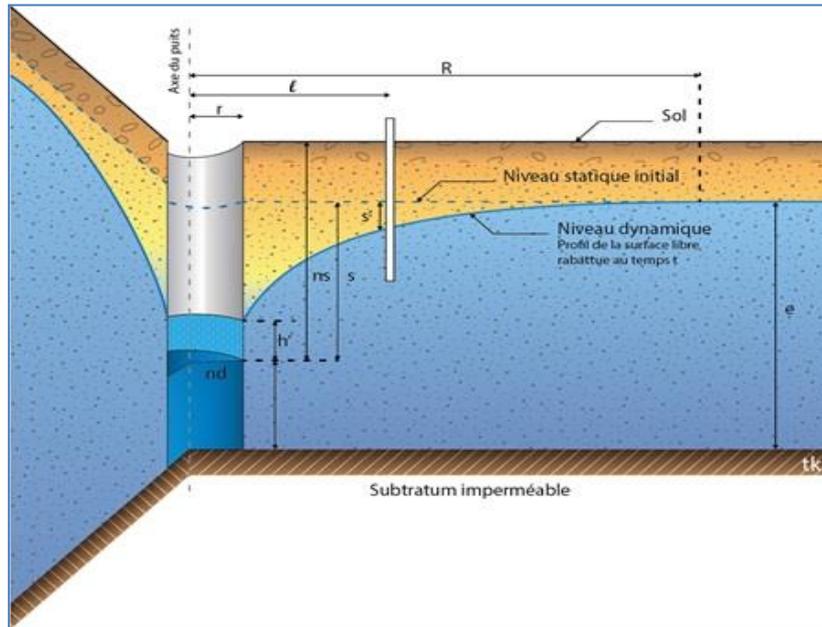


Figure (2.5). Cône de rabattement et rayon d'influence

### 2.4.1 Le rayon d'influence :

Le rayon d'influence (ou rayon d'action), noté  $R$  (en m), correspond à la distance radiale depuis l'axe d'un puits en pompage à la limite de son aire d'influence, qui serait circulaire dans des conditions idéales (homogénéité de l'aquifère, surface piézométrique initiale horizontale). Elle doit se référer au temps passé depuis le début du pompage (ou de l'injection), en régime transitoire.

Le rayon d'influence ( $R$ ) d'un puits représente l'étendue horizontale maximale du cône de dépression lorsque le puits est en équilibre avec les apports (Figure 2.6).



**Figure (2.6) : Représentation schématique du rayon d'influence, lors d'un pompage**

Il est également défini comme étant la distance maximale à laquelle les prélèvements peuvent être détectés avec les appareils de mesure habituels sur le terrain.

Il existe plusieurs formules pour le calcul du rayon d'influence. Les plus utilisées sont regroupées dans le tableau suivant (**tableau 2.1**) :

**Tableau (2.1) : Formules pour le calcul du rayon d'influence**

Auteurs	Formules
Lembke (1886, 1887)	$R = h_0 * \sqrt{\frac{k}{2N}}$
Schardt in Kyrieleis-Sichardt (1930)	$R = 3000 * s * \sqrt{k}$
Weber in Kyrieleis-Sichardt (1930)	$R = 3 * \sqrt{\frac{h_0 * K * t}{n_e}}$
Kisakin in Chetusov (1949)	$R = 575 * s * \sqrt{k * h_0}$
Formule de Kusakin in Aravin and Numerov (1953)	$R = 1,9 * \sqrt{\frac{h_0 * K * t}{n_e}}$

Avec :

R = rayon d'influence

N = Recharge annuelle

$s$  = rabattement

$h_0$  = épaisseur de l'aquifère saturé non perturbé

Le rabattement  $s$  pour les deux types de nappes (libre et captive) peut être calculé par les expressions de Braun, Farber (2004):

### 1 – Nappe libre

$$s * \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right) = -\frac{Q_0}{2\pi kh_0} \ln\left(\frac{r_w}{R}\right) \quad (2.3)$$

### 2 – Nappe captive

$$s = -\frac{Q_0}{2\pi km} \ln\left(\frac{r_w}{R}\right) \quad (2.4)$$

Où :

- ▶  $Q_0$  = débit de pompage
- ▶  $h_0$  = épaisseur de l'aquifère saturé non perturbé
- ▶  $m$  = hauteur de l'aquifère confiné
- ▶  $r_w$  = rayon du puits
- ▶  $K$  = conductivité hydraulique

#### 2.4.2 Débit spécifique :

Les débits spécifiques  $Q_s$  [ $m^3/h/m$ ] sont les débits pompés rapportés à la hauteur de rabattement. C'est Débit pompé dans un puits rapporté à la hauteur de rabattement dans le puits, dans des conditions définies. Le débit spécifique, c'est-à-dire le débit pompé par mètre de rabattement, n'est pas un paramètre hydrodynamique à proprement parler mais il permet d'approcher les débits que l'on peut attendre de l'aquifère considéré.

Il varie en fonction de la transmissivité de l'aquifère.

Dans la pratique, le développement d'un ouvrage peut s'observer en comparant l'évolution vers la stabilisation du débit spécifique au fur et à mesure de cette opération.

L'efficacité d'un puits peut s'évaluer pour un débit de pompage donné en calculant le rapport entre le débit spécifique observé au bout d'un temps conventionnel (par exemple 24 h) et le débit spécifique calculé pour le même temps d'après les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et un modèle d'écoulement autour du puits supposé parfait

#### 2.4.3 Le Débit Critique :

Le débit critique est le rendement à ne pas dépasser pendant l'exploitation au risque d'accélérer la détérioration de l'ouvrage et la mauvaise qualité de l'eau prélevée. La valeur du débit critique est déterminable graphiquement en identifiant sur la courbe caractéristique le point

d'équivalence entre les pertes de charges linéaires et quadratiques lors des essais de pompages de courte durée.

Le débit spécifique noté  $Q_{sp}$  ( $m^2/h$ ) est le paramètre traduisant la productivité intrinsèque de l'aquifère. Il est calculé par le quotient du débit pompé et du rabattement mesuré

(Équation 2.5) :

$$Q_s = \frac{Q}{s} \quad (2.5)$$

Q : débit de pompage ( $m^3/h$ )

s : rabattement induit par le pompage (m)

En pratique, c'est le débit de production au-delà duquel les pertes de charge ne croissent plus en fonction linéaire du débit.

La méthode d'évaluation du débit critique est variable selon les cas de figures rencontrés, elle repose en général, dans les milieux continus, sur le point d'égalité (débit) entre pertes de charges quadratiques ( $CQ^2$  en m) et pertes de charges linéaires (BQ, en m). Toutefois cette approche n'est pas appropriée en cas d'écoulement turbulent dans les milieux discontinus (domaine karstique, aquifères fracturés) où les rabattements linéaires sont faibles et les pertes de charges quadratiques variables, conduisant à l'estimation arbitraire d'un faible débit critique.

### 2.4.4 Débits d'écoulement des nappes :

L'existence des cartes piézométriques et de valeurs des paramètres hydrodynamiques permet d'évaluer les flux transitant dans les nappes.

Le débit d'écoulement dans une nappe est estimé par l'application de la Loi de Darcy :

$$Q = T * L * i \quad (2.6)$$

Avec :

- ▶ Q le débit ( $m^3.s^{-1}$ ) ;
- ▶ T la transmissivité ( $m^2.s^{-1}$ ) ;
- ▶ L est la largeur (section linéaire) de nappe traversée par le flux (m) ;
- ▶ i est le gradient hydraulique (sans unité).

L'utilisation des transmissivité (déterminées de façon fiable par les pompages d'essai) permet de s'affranchir du besoin de connaissance de l'épaisseur de l'aquifère

**Chapitre III :**

**La pollution**

**Des**

**Eaux**

**Souterraines**

### Chapitre 3 : La pollution des eaux souterraines :

#### 3.1 Généralités sur la pollution des eaux souterraines :

Une eau est polluée lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, présente un danger pour l'environnement.

Les causes naturelles de la dégradation de la qualité de l'eau souterraine sont donc exclues de ce concept. Exemples : dissolution de sels minéraux du réservoir, invasion des eaux salées marines dans les aquifères côtiers affluant à la mer, etc.

L'eau douce nécessaire à l'alimentation des populations en eau potable peut être soustraite à divers types de réservoirs : un cours d'eau, un lac de retenue naturel ou artificiel, une nappe d'eau souterraine.

Le choix dépend des ressources locales mais porte de préférence sur les réservoirs les moins exposés aux contaminants que sont les nappes d'eau souterraines, afin de bénéficier d'une eau brute ayant la meilleure qualité possible.

Quand la pollution y pénètre, en particulier par infiltration massive en un lieu, elle est plus ou moins retardée, et non pas directe et rapide comme dans le cas des eaux superficielles. En revanche, la contamination est beaucoup plus longue à disparaître en raison de la lenteur de la circulation de l'eau souterraine.

La pollution des eaux souterraines représente un problème environnemental majeur. Elle affecte aussi bien les pays industrialisés que ceux en développement.

Plusieurs cas sont cités à travers le monde. Des études récentes relatives à la qualité des eaux souterraines effectuées en Espagne (González Vázquez *et al.*, 2005), en Italie (Debernardi *et al.*, 2008) et en Turquie (Yesilnacar *et al.*, 2008) ont indiqué une importante contamination aux nitrates. Cette pollution est due très souvent aux rejets municipaux, industriels et domestiques. Des études effectuées en Afrique montrent que les sources de pollution des nappes d'eaux souterraines africaines sont, entre autres, les fosses septiques, les eaux usées et les dépotoirs (Tredoux and Talma, 2006). Les travaux de Chalbaoui (2000) ont révélé la présence d'importantes quantités de métaux lourds tels que le cadmium, dans la nappe superficielle du Bassin de Redayef Moularès, en Tunisie. Ikem *et al.* (2002) qui ont étudié la qualité des eaux souterraines à proximité des décharges dans les localités de Lagos et d'Ibadan, au Nigeria, ont décelé une pollution azotée et bactériologique affectant ces eaux captées au moyen de puits privés par les riverains pour leur alimentation.

En Côte d'Ivoire, Ligban *et al.* (2009) ont montré que les eaux de puits et de sources dans le degré carré de Daloa sont dominées par le faciès chloruré nitraté. Les ions chlorures et nitrates, importants dans ces eaux, proviendraient, d'après ces auteurs, entre autres, de matières organiques liées aux activités humaines ou à la production animale ou végétale.

La pollution de l'eau est la dégradation physique, chimique et/ou biologique de ses qualités naturelles, provoquée par diverses activités. On distingue plusieurs types de pollutions qui peuvent avoir une origine domestique, biologique, naturelle, agricole ou industrielle que sont :

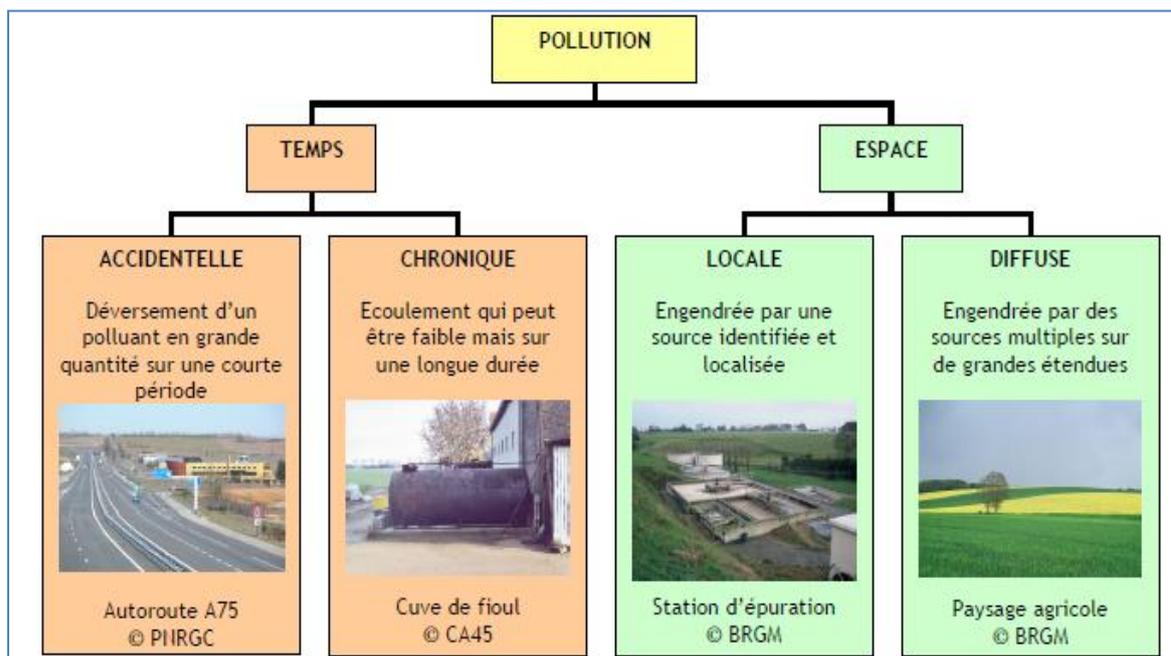
- ➔ La pollution physique altère la transparence de l'eau (présence de matières en suspension) et agit sur sa température (pollution thermique) ;
- ➔ La pollution chimique est due à des valeurs relativement élevées de substances indésirables telles que les nitrites, nitrates, phosphates et les éléments traces métalliques (ETM).

Tout apport de substances indésirables dans l'eau souterraine causé par les activités humaines est considéré comme une pollution. Ces substances sont susceptibles de s'infiltrer à travers le sol et la zone non saturée, puis d'atteindre la nappe. L'eau souterraine va alors disperser la pollution bien au-delà du lieu de contamination initiale. La contamination de l'eau souterraine sera alors difficile, et parfois impossible, à traiter.

Les contaminants de l'eau souterraine proviennent de deux catégories de sources (**figure 3.1**):

- ➔ Les sources locales (ou ponctuelles). Une pollution ponctuelle correspond à un épisode de pollution court et localisé dans l'espace
- ➔ Les sources diffuses. Une pollution diffuse est une contamination par une substance provenant d'une multitude de sources dispersées dans l'espace et dans le temps, difficilement identifiables.

Ces pollutions arrivent au niveau de la nappe phréatique par ruissellement ou par percolation (passage d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable) lente à travers les différentes épaisseurs de sol et de sous-sol.



**Figure (3.1) : Typologie et origines de la pollution des eaux souterraines**

Les nitrates et les pesticides sont les principaux polluants d'origine diffuse, tandis que les pollutions localisées se caractérisent plutôt par des contaminations bactériologiques, d'hydrocarbures ou d'autres substances telles que des métaux lourds. Une pollution chronique, c'est-à-dire qui perdure pendant un certain temps (parfois plusieurs dizaines d'années), peut aussi bien être locale que diffuse (Vernoux, Buchet, 2010).

Si les sources ponctuelles de pollutions sont facilement localisables en fonction des lieux de rejets, les sources diffuses sont, par contre, difficilement maîtrisables à identifier, et à maîtriser. Les nitrates sont des molécules azotées. Ils sont naturellement produits dans les sols par la dégradation de la matière organique par des microorganismes. La réglementation impose que les eaux distribuées aux consommateurs contiennent moins de 50 mg/L de nitrates.

Les nitrates sont la principale source d'alimentation des végétaux et notamment des végétaux cultivés pour l'alimentation humaine et animale.

Des engrais de synthèse contenant des nitrates sont donc apportés sur les parcelles cultivées chaque année. Lorsque la fertilisation est mal maîtrisée, une partie des nitrates apportés et non consommés par les plantes peut être entraînée par les pluies vers la nappe phréatique.

Les substances chimiques que nous pouvons retrouver dans l'eau sont de diverses natures :

- ▶ Pesticides utilisés par l'agriculture, par les paysagistes, les jardiniers amateurs, etc...
- ▶ Résidus de produits utilisés ou fabriqués par les industries,
- ▶ Résidus de médicaments, ...

Au-delà du risque sanitaire pour l'utilisateur, tant par l'eau qu'il peut consommer, que celle qu'il utilise pour cultiver ou abreuver ses animaux, cette situation peut avoir des effets dévastateurs sur nos réserves en eau douce et sur les captages d'eau des collectivités.

Les activités humaines menées à proximité d'un puits peuvent causer la contamination de l'eau souterraine :

- Puits mal construits et mal entretenus.
- Puits mal bouchés et raccordements croisés, p. ex. reflux des réservoirs de solution à pulvériser dans les puits.
- Traitements excessifs des sols, p. ex. fumier, engrais ou pesticides.
- Déversements sur le sol, p. ex. déversements de carburant et de pesticides.
- Élimination de matériaux tels que solvants industriels, déchets ménagers ou agricoles, médicaments sur ordonnance et produits chimiques dans les fosses septiques ou sur le sol.
- Fuites provenant de réservoirs de carburant souterrains et en surface.

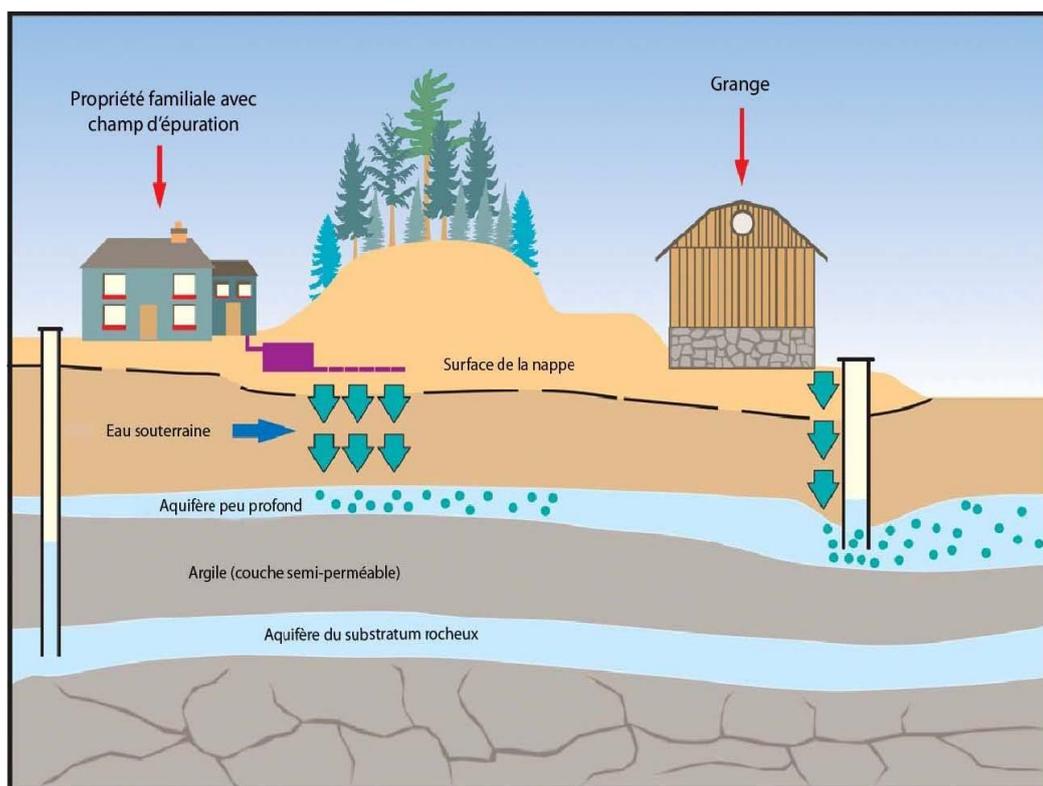
Une fois que les eaux souterraines sont polluées, il devient extrêmement compliqué et coûteux d'enlever la contamination... et encore, quand cela reste possible ! Il convient, à minima, de respecter la distance réglementaire de sécurité de 35 mètres entre un assainissement non collectif et un ouvrage de captage d'eau (**Figure 3.2**).



**Figure (3.2) Distance obligatoire entre assainissement non collectif et un ouvrage de captage d'eau**

La majorité des polluants organiques, en particulier les pesticides, sont soumis à des phénomènes de rétention et de dégradation qui font que seule une fraction des produits migre via la nappe d'eau souterraine vers le captage. Mais parallèlement à la disparition de la molécule mère, on peut retrouver dans le sol puis dans le captage des produits de dégradation.

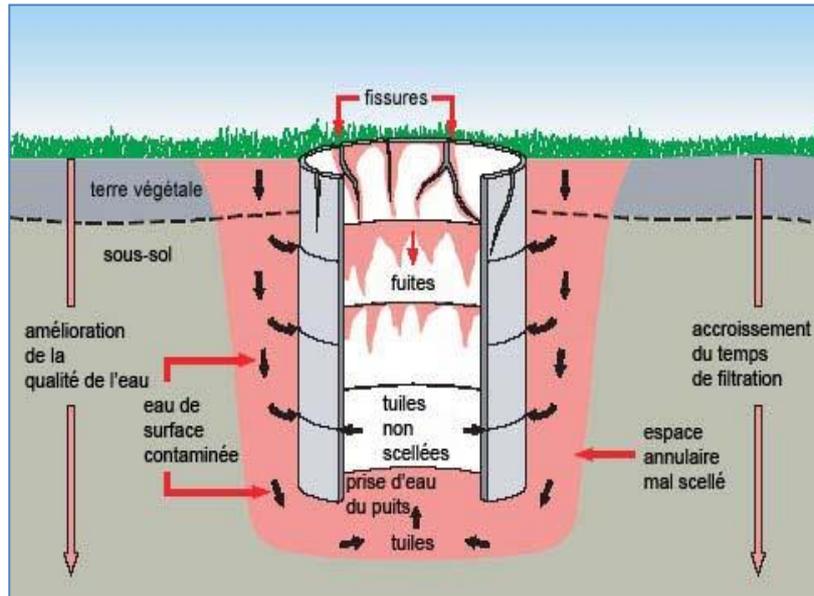
La figure (3.3) illustre comment les déchets d'origine animale et humaine peuvent contaminer l'eau souterraine. Lorsque l'eau de surface s'infiltré dans le sol jusqu'à l'eau souterraine, elle peut entraîner des agents pathogènes avec elle. Dans le cas où ces agents ne sont pas éliminés par l'action nettoyante naturelle des sols, il est probable qu'ils survivent et s'introduisent dans l'eau souterraine. Plus le temps de filtration est court, plus grand est le risque de contamination.



**Figure (3.3) : infiltration des agents pathogènes**

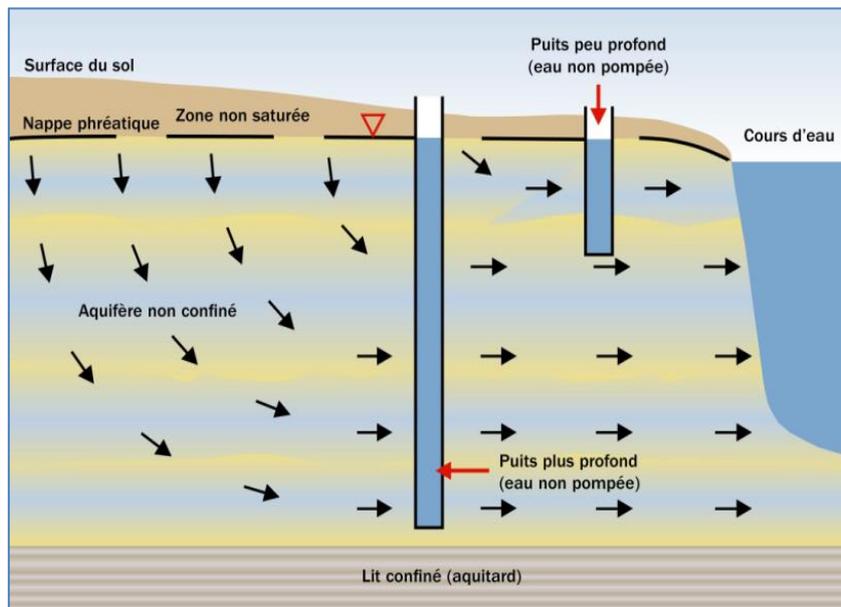
Dans la figure (3.4), les flèches indiquent les voies que peuvent suivre les agents pathogènes pour s'infiltrer dans un puits peu profond, mal construit et détérioré par le temps.

La zone d'ombre rouge indique l'espace annulaire. Dans ce puits, l'espace annulaire est descellé au sommet et permet à l'eau de surface contaminée de s'écouler vers le fond, dans la prise d'eau du puits. Pire encore, l'eau de surface contaminée peut aussi s'infiltrer dans le puits par des joints de tuyau descellés ou des fissures. (Remarque : afin de rendre le diagramme plus clair, la partie nécessaire du puits qui se trouve à la surface du puits n'est pas représentée sur ce schéma.)



**Figure (3.4) : Migration des agents pathogènes dans un puits peu profond, mal construit et détérioré**

En l'absence de pompage, l'eau s'infiltré sous la surface du sol, s'écoule peu à peu dans l'aquifère jusqu'à la nappe phréatique, puis se déplace horizontalement vers une zone de décharge ou un effluent, comme un cours d'eau (**figure 3.5**).

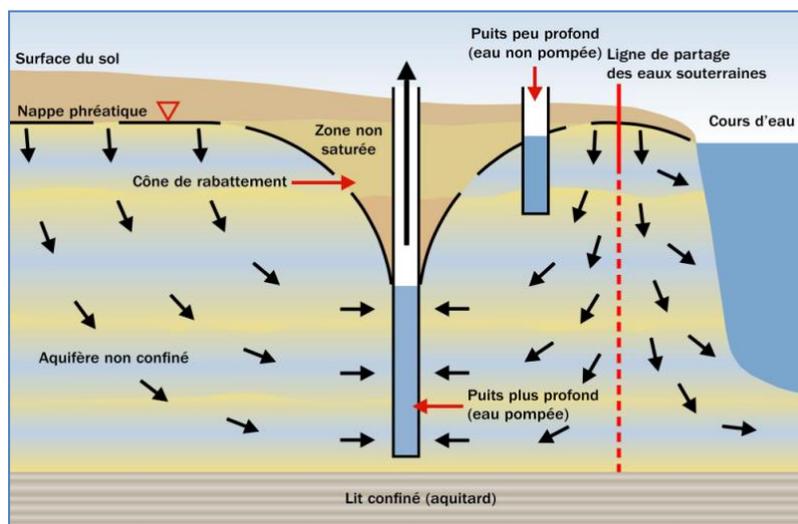


**Figure (3.5) : Aquifère non confiné avant le pompage**

S'il y a pompage de l'eau d'un puits situé dans un aquifère non confiné, l'eau est extraite de l'aquifère, ce qui amène une baisse de la nappe phréatique. Ce « rabattement » de la nappe

phréatique est maximal contre les parois du puits et s'estompe à mesure que l'on s'éloigne du puits, au fur et à mesure que le rayon autour du puits augmente (**figure 3.6**).

On parle de « cône de rabattement » pour désigner ce phénomène en raison de la forme que prend alors l'aquifère. La taille et la forme du cône de rabattement varient en fonction du débit et de la durée de pompage.



**Figure (3.6) Influence du pompage sur la nappe phréatique dans un aquifère non confiné**

### 3.2 Vulnérabilité des nappes à la pollution.

La vulnérabilité est le « défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales ».

Des nappes profondes séparées de la surface par des couches imperméables vont être moins vulnérables que des nappes superficielles, nappes alluviales par exemple, proches de la surface du sol.

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse (Gogu et Dassargues 1998 ; Lallemand Barres 1994 ; Lallemand barres et Roux 1989). Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface.

La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique;

d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à rincer les particules de la zone non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées.

Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage (ancien forage, fouille profonde...) Enfin, la percolation de l'eau dans un milieu poreux peut produire une fixation des substances sur les particules et donc une épuration de l'eau. Ce phénomène n'existe pas dans les milieux fissurés où la circulation est bien plus rapide.

La vulnérabilité des eaux souterraines est définie en partant d'une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traversé. Ce milieu est subdivisé en couches horizontales dans lesquelles des processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu simultanément. La migration d'une substance polluante emprunte naturellement les zones suivantes (**Figure 3.7**) :

- La Zone de l'Interface Sol (ZIS), qui constitue le domaine des activités polluantes;
- La Zone Non Saturée (ZNS), qui est le domaine du transfert vertical;
- La Zone Saturée (ZS), qui est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.

La troisième zone (ZS) est caractérisée par un pouvoir de dilution et de transfert latéral. Les deux premières zones sont caractérisées par un pouvoir de recharge et d'épuration naturelle. Cette spécificité bien particulière leur confère le rôle d'un filtre naturel. Selon son degré de protection, cette couche de couverture (ZIS + ZNS) pourrait atténuer, voire empêcher totalement le contaminant d'atteindre la nappe. Avec cette optique, dans l'adaptation de cette méthode, nous n'avons pris en compte que les deux premières zones.

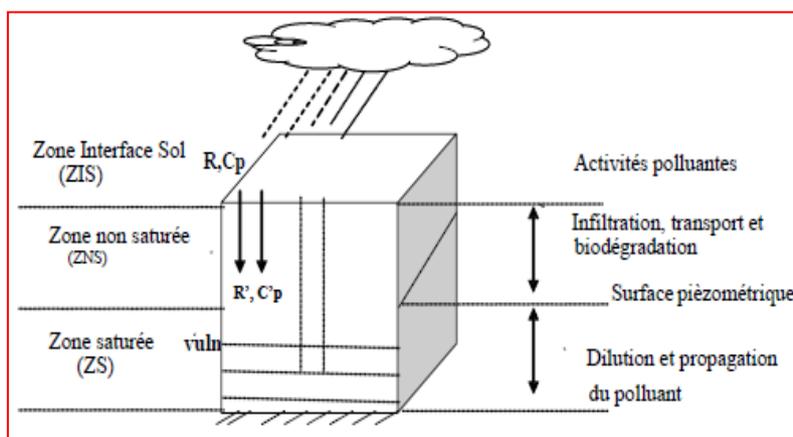


Figure (3.7). Schéma de la contamination des eaux Souterraines

On distingue usuellement :

- ▶ **La vulnérabilité intrinsèque**, pour laquelle on ne présage pas de la nature des polluants ; elle est fonction des caractéristiques du milieu aquifère, en l'occurrence de la couverture du sol et des formations géologiques surmontant la nappe ;
- ▶ **La vulnérabilité spécifique** à un polluant en particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leur capacité à interagir avec les différents composants de la vulnérabilité intrinsèque (le sol notamment).

La vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine se définit comme sa sensibilité à la contamination par l'activité humaine. Pour l'évaluer on utilise la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987). Cette méthode permet d'évaluer la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la base des cadres géologique et hydrogéologique. Elle fait abstraction de la nature des contaminants et des facteurs de risque reliés à des paramètres tels que la proximité des usagers, les activités pratiquées en surface, etc.

L'indice DRASTIC est basé sur sept paramètres dont les premières lettres forment l'acronyme DRASTIC : profondeur (depth) de la nappe (D), recharge annuelle (R), type d'aquifère (A), type de sol (S), topographie des lieux (T), impact de la zone vadose (I) et conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Un poids est attribué à chacun des paramètres selon son influence. Le produit de ce poids par une cote dépendant des conditions locales constitue un indice partiel et la somme de ces indices forme l'indice DRASTIC. Cet indice peut varier de 23 à 226.

Selon l'article 53 du RPEP, la vulnérabilité de l'eau souterraine établie à l'aide de l'indice DRASTIC comporte trois niveaux :

- Vulnérabilité faible : indice DRASTIC égal ou inférieur à 100;
- Vulnérabilité moyenne : indice DRASTIC supérieur à 100 et inférieur à 180;
- Vulnérabilité élevée : indice DRASTIC égal ou supérieur à 180.

### 3.3 Migration des polluants au sein du milieu souterrain

Comme nous en sommes de plus en plus conscients, l'activité humaine peut modifier profondément l'environnement. Et c'est souvent là où les interactions sont les moins visibles que les impacts peuvent être les plus grands. C'est le cas des eaux souterraines où des matières polluantes venant de sites d'enfouissement ou d'activités industrielles peuvent s'infiltrer et être transportées.

Ce phénomène peut entraîner une contamination de l'eau destinée à la consommation ainsi que des cours d'eau, lacs et terres humides en contact avec cette eau souterraine. Il revient

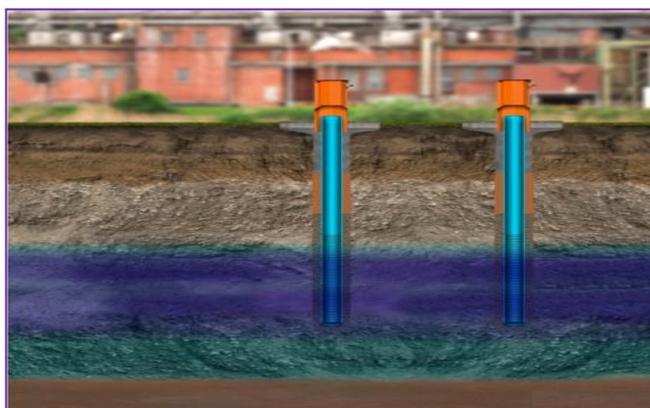
normalement aux ingénieurs de s'assurer qu'un projet de développement ou d'utilisation d'un site tienne compte des exigences, pratiques et règlements, en matière d'environnement et de développement durable.

Cela implique notamment la considération des impacts environnementaux potentiels à court et à long termes et l'élaboration de programmes de prévention de la pollution et de réduction des déchets. Pour l'ingénieur, ces obligations à l'égard de l'environnement doivent être mises au premier plan, au même titre que celles liées à la santé et à la sécurité.

L'évaluation du risque de contamination de l'eau souterraine repose sur la modélisation mathématique et la simulation de l'écoulement des eaux souterraines.

Des logiciels spécialisés existent pour effectuer ces simulations, mais la qualité des prédictions dépend de l'adéquation de la modélisation qui a été menée pour décrire le milieu à l'étude et de l'applicabilité pour ce milieu des méthodes et hypothèses utilisées par le logiciel. L'eau s'infiltre depuis la surface du sol et une partie finit par atteindre la zone saturée de l'aquifère (nappe superficielle); c'est le mécanisme de recharge de la nappe.

En fonction du contexte, cette eau pourra par la suite migrer horizontalement ou verticalement (en présence de fractures, de conduits et cavités karstiques, le temps de transfert est très rapide). De la même manière, une pollution provenant de la surface du sol, d'une canalisation ou d'une cuve enterrée, parvient jusqu'à la nappe superficielle sous forme pure (huileuse par exemple), sous forme dissoute voire sous forme particulaire (**Figure 3.8**).



**Figure (3.8): Pollution d'une nappe – cas d'une pollution liée à une ou plusieurs substances solubles (panache violet présent sur les 2/3 de la nappe).**

Selon les caractéristiques hydrogéologiques locales (gradient hydraulique, dispersivité, perméabilité ou conductivité hydraulique), la géométrie des panaches sera variable (**Figure 3.9**). Il pourra donc être nécessaire d'implanter un réseau resserré et/ou densifié, pour être à même d'intercepter un éventuel panache avec un degré d'incertitude acceptable.

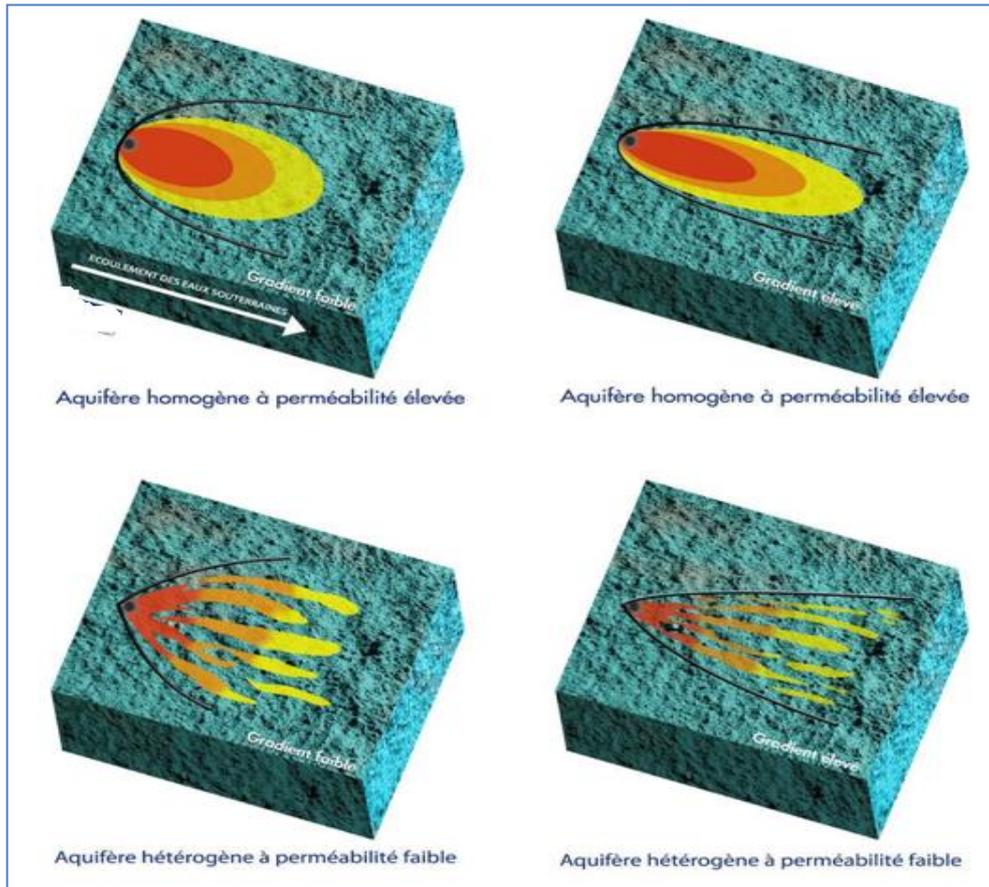


Figure (3.9): Effet du gradient hydraulique et des hétérogénéités sur la propagation d'une pollution dans un aquifère alluvial (cas d'un milieu poreux).

# Chapitre IV:

## La protection

## de captage et

## Le cadre

## Juridique

### Chapitre 4 : La protection de captage et le cadre juridique

#### 4.1. Introduction

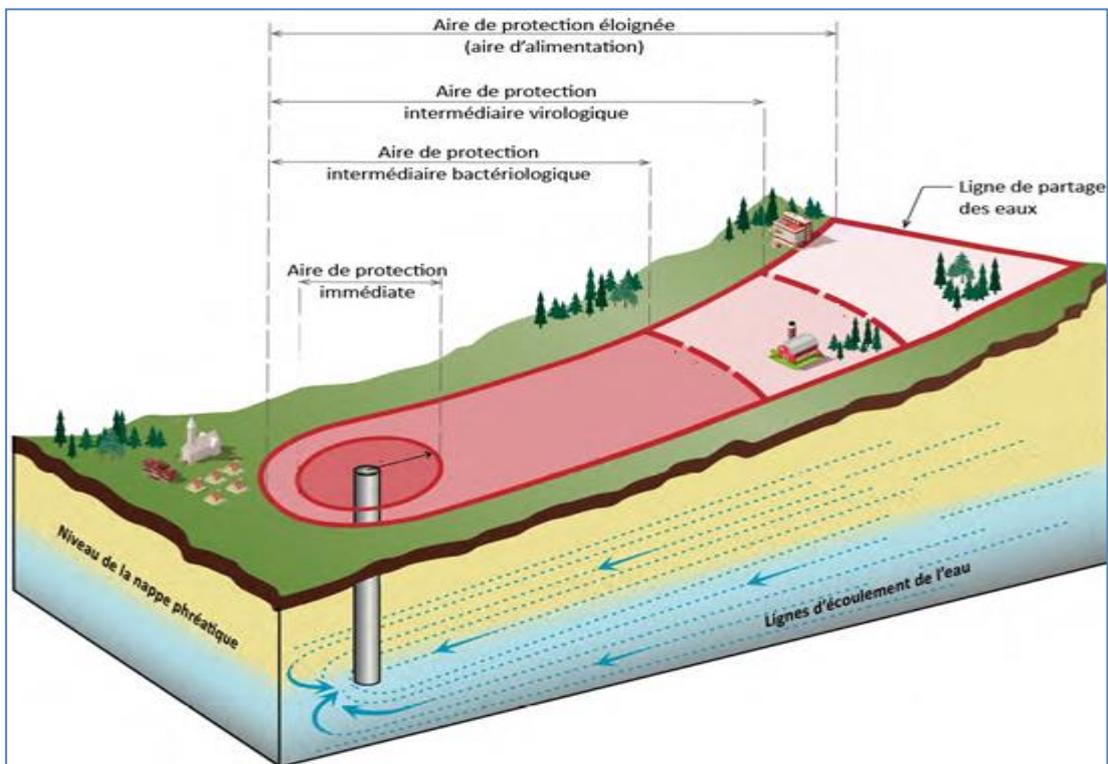
Fournir une eau conforme aux critères de potabilité constitue une obligation et une responsabilité importante. Pour répondre à cet objectif, protéger la ressource est prioritaire.

Une aire d'alimentation de captage (AAC) correspond aux surfaces sur lesquelles l'eau qui s'infiltré ou ruisselle participe à l'alimentation de la ressource en eau dans laquelle se fait le prélèvement destiné à l'alimentation en eau potable.

Cette zone est délimitée dans le but principal de lutter contre les pollutions diffuses risquant d'altérer la qualité de l'eau prélevée par le captage.

La zone de protection correspond aux secteurs de l'AAC les plus vulnérables aux pollutions diffuses (nitrates et pesticides). Les aires de protection sont des portions de l'aire de l'alimentation dans lesquelles les activités potentiellement polluantes doivent être restreintes ou interdites de manière à protéger le prélèvement d'eau.

L'aire d'alimentation d'une source d'eau potable souterraine est définie comme étant la superficie du terrain au sein duquel les eaux souterraines y circulant vont éventuellement être captées par l'installation de prélèvement d'eau (**Figure 4.1**).



**Figure (4.1) : Schématisation des aires de protection d'un site de prélèvement d'eau souterraine de catégorie**

### 4.2 Les Zones de protection

Défini sur la base de critères hydrogéologiques, la protection des captages s'articule autour de périmètres de protection (**Figure 4.2**) réglementaire qui permettent de protéger prioritairement les captages des pollutions ponctuelles et accidentelles et de diluer les pollutions en amont, dont les pollutions diffuses du bassin d'alimentation de captage (BAC).

Trois périmètres de protection réglementaires sont prévus par les textes :

- **Le périmètre de protection immédiate (Zone 1)**: C'est la parcelle d'implantation du captage. Il vise à éliminer tout risque de contamination directe de l'eau captée. Il doit être clôturé. Toute activité y est interdite.
- **Le périmètre de protection rapprochée (Zone 2)** : Il a pour but de protéger le captage vis-à-vis des migrations de substances polluantes et est défini en fonction des caractéristiques hydrogéologiques du secteur, de la vulnérabilité de la nappe et des risques de pollution.

Les activités, constructions ou stockages à risques pouvant nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux y sont réglementés voire interdits.

Des servitudes d'utilité publique y sont définies et s'imposent aux usagers et propriétaires des parcelles situées sur ce territoire.

- **Le périmètre de protection éloignée (Zone 3)** : Son objectif est de renforcer la protection, notamment vis-à-vis des pollutions chimiques.

La définition d'un tel périmètre est facultatif, mais l'expérience démontre son utilité pour sécuriser la qualité de la ressource en eau. Les activités à risques y sont plus strictement réglementées.

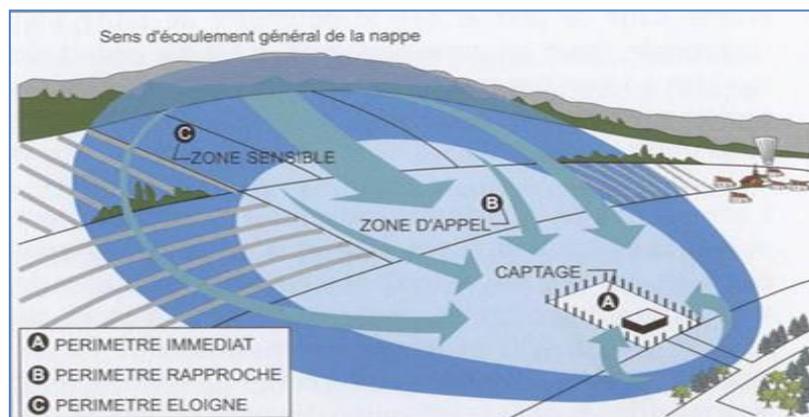
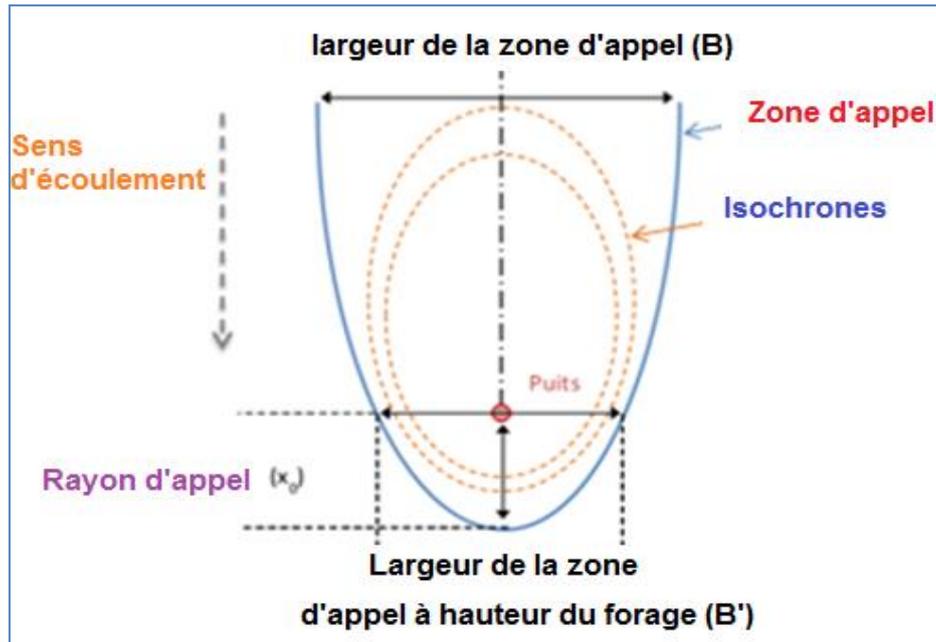


Figure (4.2) : Périmètres de protection de captage d'eau souterraine

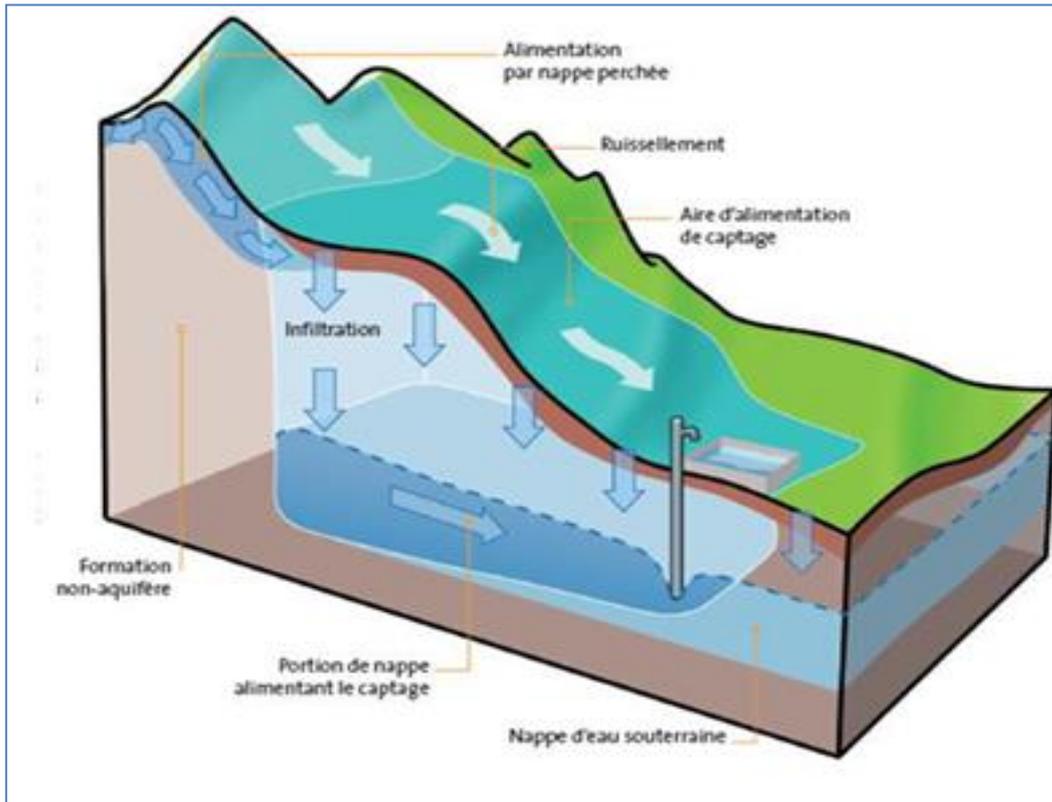
La zone d'appel, appelée « front d'emprunt », représente la zone vers laquelle l'eau va être influencée et attirée vers le captage (en pompage). La forme théorique de cette zone est modélisée pour une nappe homogène, d'épaisseur et de gradient constant.

A l'intérieur l'eau se déplace de plus en plus rapidement vers le captage et les isochrones (temps de transit du milieu vers le captage) (**Figure 4.3**).



**Figure (4.3) : la zone d'appel et du tracé des isochrones**

L'Aire d'Alimentation de Captage (AAC) (**Figure 4.4**), représente les surfaces sur lesquelles l'eau qui s'infiltré ou ruisselle participe à l'alimentation de la ressource en eau dans laquelle se fait le prélèvement, cette ressource étant effectivement utilisée pour l'alimentation en eau potable ou susceptible de l'être un jour. Dans les cas simples, l'aire d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. Elles sont définies sur des bases hydrologiques ou hydrogéologiques. Pour un captage en eaux superficielles : au bassin versant (BV) topographique situé en amont de la prise d'eau, pour un captage en eaux souterraines : au bassin d'alimentation du captage c'est-à-dire le lieu où la goutte d'eau qui tombe sur le sol et qui contribue à l'alimentation du captage).



Figure(4.4) : Aire d'Alimentation de Captage

La protection des captages est réglementée par le Code de l'eau, (Figure 4.5) qui définit des zones dans lesquelles certaines activités (domestiques ou industrielles) sont limitées voire interdites :

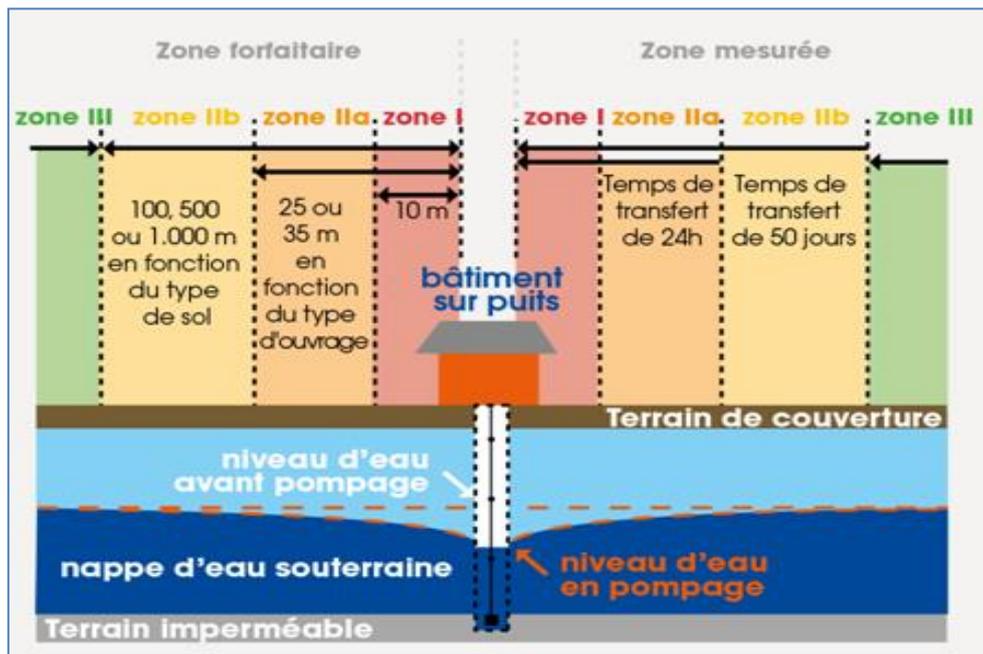


Figure (4.5) : Les zones de prévention réglementée

## **Chapitre IV : La protection de captage et le cadre juridique**

---

Les zones de prévention correspondent à des périmètres de sécurité aux abords des captages. Elles sont établies soit en mesurant le temps de transfert de l'eau souterraine jusqu'au point de captage, soit de manière forfaitaire en fonction de l'ouvrage (puit, émergence ou galerie) et de la nature de l'aquifère (sable, craie, schiste, etc.).

- **Zone de prise d'eau – Zone (I)**: la zone de prise d'eau correspond à l'aire géographique dans laquelle est installé un ouvrage de surface de prise d'eau. Elle est délimitée par la ligne située à une distance de 10 mètres des limites extérieures des installations de surface strictement nécessaires à la prise d'eau. Afin d'éviter tout rejet direct dans cette zone, toutes les activités et installations autres que celles nécessaires à l'usage de la prise d'eau y sont interdites.
- **Zone de prévention rapprochée – Zone (II a)** : zone à l'intérieur de laquelle une pollution transportée par l'eau souterraine pourrait atteindre le captage en moins de 24 heures.
- **Zone de prévention éloignée – Zone (II b)** : zone à l'intérieur de laquelle une pollution transportée par l'eau souterraine pourrait atteindre le captage en moins de 50 jours.
- **Zone de surveillance – Zone (III)** : zone qui correspond à l'aire géographique du bassin d'alimentation du captage.

### **4.3 Les activités interdites au niveau de chaque périmètre**

Au sein des zones de prévention, certaines installations sont obligatoires pour limiter les infiltrations directes (ex : étanchéification des fossés et des voiries).

D'autres installations et activités à risque sont interdites, telles que les centres d'enfouissement, les terrains de camping ou l'implantation de nouveaux cimetières.

**Au niveau de la zone S1, les activités non autorisées sont :**

- ✗ Seuls les travaux de construction et
- ✗ Les activités servant à l'approvisionnement en eau potable sont autorisées ; une exception est consentie pour l'herbe fauchée laissée sur place.

**Au niveau de la zone S2, les activités non autorisées sont :**

- ✗ La construction d'ouvrages et d'installations (l'autorité peut accorder des dérogations pour des motifs importants si toute menace pour l'utilisation d'eau potable peut être exclue)

- ✗ Les travaux d'excavation altérant les couches de couverture protectrices ;
- ✗ L'infiltration des eaux à évacuer ;
- ✗ Les autres activités susceptibles de réduire la quantité d'eau potable et d'altérer sa qualité.

### **En ce qui concerne la zone S 3, les activités interdites sont :**

- ✗ Les exploitations industrielles et artisanales impliquant un risque pour les eaux du sous-sol ;
- ✗ Les constructions diminuant le volume d'emménagement ou la section d'écoulement de l'aquifère ;
- ✗ L'infiltration des eaux à évacuer, à l'exception des eaux non polluées s'écoulant des toits à travers une couche recouverte de végétation ;
- ✗ La réduction importante des couches de couverture protectrices ;
- ✗ Les circuits thermiques qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans le sous-sol;
- ✗ Les réservoirs contenant des liquides de nature à polluer les eaux, dont le volume utile dépasse 450 l par ouvrage de protection, à l'exception des réservoirs non enterrés pour huile de chauffage et huile diesel destinés à l'approvisionnement en énergie de bâtiments ou d'exploitations pour deux ans au maximum ; le volume utile total de ces réservoirs ne doit pas dépasser 30 m<sup>3</sup> par ouvrage de protection ;
- ✗ Les installations d'exploitation contenant des liquides de nature à polluer les eaux, dont le volume utile dépasse 2000 l.

### **4.4 Délimitation de zones de protection**

#### **4.4.1 Définition et objectif**

Un périmètre de protection est un espace délimité physiquement (clôture, cercle de pierres...) afin de sauvegarder et protéger l'accès à un espace qui présente un intérêt esthétique ou patrimonial, ou bien une dangerosité certaine (EPA, 1995).

Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines sont définis comme étant un outil idéal pour aviser et réduire toute cause de pollution susceptible de nuire à la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable.

La mise en place des périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation et la surveillance des prescriptions associées, améliorent la sécurité sanitaire en réduisant le risque de pollution microbienne ou toxique massive et brutale

en contrôlant les activités susceptibles de générer des pollutions accidentelles pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux.

La notion des périmètres de protection est largement traitée dans la littérature internationale. Au niveau national cinq types de textes réglementaires sont concernés par la protection des captages d'eau potable : des textes relatifs à l'eau, à l'hygiène publique, à l'environnement, à la gestion foncière et à la décentralisation.

Les différentes approches employées pour délimiter ces zones de protection sont fondées sur la distance, le rabattement de la nappe, le temps de transport d'un contaminant jusqu'à la ressource, le temps d'atténuation nécessaire pour réduire la quantité de polluant et les délimitations hydrogéologiques.

Ainsi, selon les pays, et selon les quantités de données disponibles, la délimitation des zones se fait soit sur des critères parfois fixés arbitrairement soit sur des approches plus complexes avec des calculs et des modélisations. D'une manière générale, le concept actuel des zones de protection des eaux souterraines est basé sur les paramètres suivants : temps de transit (à cause des germes) et distance depuis l'ouvrage de captage.

La protection la plus répandue à travers le monde contient le zonage suivant :

- **Zone I : Protection immédiate**, contre une dégradation physique ou une introduction directe de polluants dans le captage (10 à 30 m depuis l'ouvrage de captage).
- **Zone II : Protection rapprochée**, contre une pollution bactériale ou virale (définie par un temps de transit d'environ 50 jours pour aller jusqu'à l'ouvrage de captage, avec une distance d'au minimum 50 m depuis l'ouvrage).
- **Zone III : Protection éloignée**, contre les polluants persistants (généralement délimitée par la totalité du bassin d'alimentation).

On notera que, d'une manière générale, la protection s'appuie sur des critères purement hydrogéologiques. Une carte de la vulnérabilité de l'aquifère accompagne généralement les zones de protection.

De nombreuses méthodes sont présentées dans la littérature. Vrba et Zaprozec (1994) résumet et classent les différentes méthodes ; ils font notamment la distinction entre les vulnérabilités intrinsèques (indépendantes des polluants) et spécifiques (prise en compte des propriétés d'un polluant ou d'un groupe de polluants particulier). Les méthodes sont généralement basées sur une cotation de 3 à 15 paramètres.

### 4.4.2 Cadre réglementaire pour la protection des captages dans quelques pays et en Algérie

- **En France**, les périmètres de protection des captages avaient été instaurés par la loi de 1964 et des outils complémentaires ont ensuite été rajoutés pour protéger les captages, comme la désignation de ZSCE (« Zones soumises à Contraintes Environnementales ») de la loi LEMA de 2006. Cette loi a également instauré la délimitation des AAC (« Aires d’Alimentation des Captages ») qui vise à identifier les zones sur lesquelles concentrer les actions (par l’établissement d’un plan d’actions) afin de lutter contre la pollution diffuse. Le terme AAC qui est utilisé uniquement en France semble correspondre au terme « *Whole catchment* » employé au Royaume-Uni.
- **En Allemagne**, c’est la loi sur le régime des eaux de 1957 qui est la loi-cadre édictant les règles à respecter par chaque länder. Cette loi a été modifiée plusieurs fois : en 2010 pour la dernière fois. Concernant la protection des captages, chaque länder établit ensuite une loi qui lui est propre (*Land Water Act*), qui reprend les règles de la loi nationale sur l’eau et qui les complète éventuellement. De plus, afin de coordonner l’action de chaque land et de favoriser la collaboration dans le domaine de la protection des ressources en eau, un groupe de travail a été établi : le *Länderarbeitsgemeinschaft* (ou LAWA).
- **En Espagne**, les périmètres de protection des captages étaient déjà mentionnés dans la loi sur l’eau espagnole (*La Ley de Aguas*) de 1985, révisée en 2001 pour transposer la DCE. Un guide officiel pour l’élaboration des périmètres de protection a été rédigé dès 1991, puis remis à jour en 2003, par l’IGME (*Instituto Geológico y Minero de España*). En plus de la loi nationale, qui est mise en application par décrets royaux, la protection des captages AEP est assurée par l’application de la législation de chacune des communautés autonomes.
- **Au Royaume-Uni**, 3 principales lois régissent la protection des ressources en eau : l’*Environmental Protection Act* (1990, révisé en 1995), la *Water Resources Act* (1991) et la *Water Act* (2003). Des plans et stratégies nationales, rédigés par l’Agence de l’Environnement, sont également pertinents au niveau

de chaque nation composant le Royaume-Uni : comme par exemple la stratégie pour l'Angleterre et les Pays de Galles de 2009.

➡ **Aux USA**, l'approvisionnement en eau potable d'environ la moitié de la population provient de captages d'eaux souterraines (puits ou sources). Pour permettre l'application de l'Amendement sur les eaux potables (SDWA) introduit en juin 1986 et demandant une protection des ressources en eaux souterraines, l'Agence pour la Protection de l'Environnement (USEPA) a élaboré un guide pour le dimensionnement des zones de protection (USEPA, 1987 ; réimprimé en 1993). Le guide présente une certaine flexibilité pour déterminer l'approche appropriée de délimitation. Six méthodes sont proposées et comparées :

- 1) Rayon fixé arbitrairement,
- 2) Rayon calculé, basé sur le temps de transport d'un contaminant par rapport au débit soutiré d'un puits,
- 3) Formes variables simplifiées, uniformisées à partir de modèles analytiques sur la base de conditions et de paramètres hydrogéologiques ainsi que des taux de pompages donnés,
- 4) Modèles analytiques,
- 5) Cartographie hydrogéologique, élaborée à partir de méthodes géologiques, géophysiques et de traceurs permettant de déterminer les frontières d'écoulement et les temps de migration des polluants,
- 6) Modélisation numérique, basée sur les équations d'écoulement et de transport de masse.

Le choix de la méthode et les valeurs seuil définissant les zones de protection dépendent aussi bien de critères administratifs (adéquation aux buts de protection, coûts, facilité de compréhension, capacité à être défendu, etc.), techniques (facilités d'application, quantité de données nécessaires, précision, etc.) et hydrogéologiques (distance, rabattement, temps de transit, limites des écoulements, etc.). Des matrices de comparaison entre les différents critères sont proposées, afin de faciliter la sélection de la méthode. Chaque Etat est responsable de la protection de ses eaux souterraines et a ses propres directives de protection. Des affinages locaux des systèmes de protection en vigueur sont, de surcroît, effectués par certains comtés.

## Chapitre IV : La protection de captage et le cadre juridique

---

L'USEPA propose de définir trois zones de protection de façon à assurer une protection physique, microbienne et chimique. Selon son analyse, la zone I devrait généralement être basée sur une distance d'au moins 30 m, et les zones II et III sur des temps de transit d'au moins 50 jours et 15 ans, respectivement.

- **En Belgique**, trois périmètres de protection sont distingués : immédiate (10 m), rapprochée (1 jour ou, à défaut de données suffisantes, 35 m autour d'un puits ou 25 m de part et d'autre de l'axe d'une galerie) et éloignée (50 jours ou, à défaut de données suffisantes, 1000 m pour un aquifère de fissures ou karstique, 500 m pour un aquifère graveleux, 100 m pour un aquifère sableux) (Gouvernement Wallon, 1992). En ce qui concerne les pesticides, si la concentration en substances actives est jugée trop élevée, des mesures adéquates conduisant à la modification de certaines pratiques agricoles, domestiques et autres, allant jusqu'à l'interdiction d'épandage de produits pesticides, peuvent être exigées.
- **Aux Pays-Bas**, cinq périmètres de protection – immédiate (30 m), rapprochée (60 jours) et éloignée (10 ans/min 800 m, 25 ans/min 1200 m et bassin d'alimentation) - sont distingués. Les zones sont généralement définies à partir de modèles analytiques ou numériques (USEPA, 1987).
- **En Suisse** la protection axée sur l'utilisation de l'eau demande de définir, en plus de l'aire Au, les zones de protection suivantes :
  - Un secteur de protection, nommé aire d'alimentation Zu, défini comme :  
« (L'aire qui) couvre la zone où se reforment, à l'étiage, environ 90% des eaux du sous-sol pouvant être prélevées au maximum par un captage. Lorsque la détermination de la zone demande un travail disproportionné, l'aire d'alimentation Zu couvre tout le bassin d'alimentation du captage. » Ce secteur de protection est spécialement dédié aux polluants persistants. La définition permet d'exclure les parties qui ne contribuent que de manière marginale à l'alimentation du captage.
  - Trois zones de protection : une protection immédiate définie par une distance de 10 m autour de l'ouvrage de captage (S1), une protection rapprochée correspondant à un temps de transit de 10 jours et au min. une distance de 100 m (S2) et une protection éloignée, servant de zone tampon autour de la S2,

définie par une extension approximativement deux fois plus grande que la S2 (S3) (1). Ces secteurs sont inclus dans l'aire Au.

- Un périmètre de protection, également inclus dans l'aire Au, servant à protéger les eaux souterraines sur une certaine surface, en vue d'une utilisation future (exploitation ou alimentation artificielle).

➡ **Au Danemark**, l'alimentation en eau repose sur la bonne qualité des eaux souterraines (volonté de ne pas recourir à des processus coûteux d'épuration). Cette ressource étant menacée par le développement urbain et agricole, le gouvernement danois a lancé, en 1995, un plan pour améliorer la protection des eaux souterraines (restriction sur l'utilisation de pesticides, etc.).

En 1997, la surface du pays a été classifiés en trois catégories : aquifères particulièrement valables, valables et moins valables. En 1999, ce plan a été suivi par la décision de promouvoir une cartographie hydrogéologique détaillée, sur 37% du territoire du Danemark, dans les zones de captages importantes. L'idée est de pouvoir distinguer les secteurs pourvus d'une couverture d'argile protectrice au-dessus des aquifères des secteurs plus vulnérables ; des études ont effectivement montré des concentrations en nitrates plus faibles en dessous d'une protection d'argile, qu'en dessous de secteurs sableux (Thomsen et al., 2004).

Cette cartographie de la vulnérabilité est basée sur des méthodes géophysiques électriques (PACES) et électromagnétiques (PATEM ou SKYTEM) combinées avec des sondages à la tarière - avec logs gamma et de la résistivité électrique, ainsi qu'un échantillonnage des eaux souterraines, en profondeur. Ces cartes sont utilisées pour établir des zones de protection spécifiques au site qui complètent les trois zones actuelles de protection (rayons de 10 et 300 m autour du captage et bassin d'alimentation).

La délimitation du bassin d'alimentation est généralement basée sur des modèles numériques (particle tracking). La cartographie détaillée devrait être achevée en 2010. Des règlements d'utilisation du territoire spécifiques à chaque zone ont été définis, afin de prévenir la pollution des eaux souterraines. Certaines restrictions sur l'agriculture peuvent être compensées économiquement.

➡ **Au Québec**, trois périmètres de protection – immédiate (30 m), rapprochée (60 jours) et éloignée (bassin d'alimentation) - sont distingués (MEF, 1995). Ils sont, dans la majorité des cas, délimités par une solution analytique de l'équation de l'écoulement souterrain. Dans le cas où les conditions locales ne sont pas conformes aux hypothèses implicites de ces modèles, une autre méthode plus appropriée devra être utilisée.

Les méthodes proposées sont celles du guide des périmètres de protection élaboré en 1987 par l'USEPA. Des ceintures d'alerte à l'aide de piézomètres de surveillance sont recommandées. Le 15 juin 2002, un nouveau règlement sur le captage des eaux souterraines a été adopté. Par ce règlement, la détermination de l'aire d'alimentation (protection contre les polluants persistants) et des aires de protection bactériologique et virologique de tout ouvrage de captage d'eau de boisson de débit moyen d'exploitation journalier supérieur à 75 m<sup>3</sup> est obligatoire, ainsi que la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines captées par l'ouvrage. Un guide spécialisé (Rasmussen et Rouleau, 2003) a été publié à ce sujet.

La méthodologie consiste à délimiter une aire d'alimentation de première estimation déterminée par solution analytique et basée sur les informations disponibles. Lorsqu'il apparaît qu'en amont hydraulique du captage il n'existe aucune source potentielle de contamination, l'aire d'alimentation déterminée est jugée suffisamment sécuritaire et des dépenses supplémentaires pour une détermination plus exacte de l'aire d'alimentation ne sont pas justifiées.

En cas de présence de sources potentielles de contamination ne pouvant être éliminées, la prochaine étape vise à préciser l'aire d'alimentation en ciblant la recherche d'information sur les zones à risque et sur les problèmes amenés par cette source; le degré d'élaboration de l'étude doit être adapté à l'enjeu.

Une cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère est réalisée en complément ; elle devrait idéalement couvrir l'aire d'alimentation mais elle est généralement limitée à la surface des aires de protection rapprochée.

**Tableau (4.1) : Comparaison des zones de protection mises en place dans plusieurs pays**

Pays	1 <sup>ère</sup> Zone	2 <sup>ème</sup> Zone	3 <sup>ème</sup> Zone	4 <sup>ème</sup> Zone
Allemagne	10-30 m	50 j	Intégralité du Bassin hydrographique	
Autriche	< 10 m	60 j	Intégralité du Bassin hydrographique	
Belgique	10-30 m ou 1 j	100-1000 m ou 50-60 j	2 km (protection chimique) ou intégralité du bassin hydrographique	
Danemark	10 m	60j ou 300 m	10-20 ans	
Espagne	1 j (100-400 m <sup>2</sup> )	60 j	4-10 ans	Zone de protection de la quantité et parfois zone contre l'intrusion saline
Etats-Unis	30 m	165 m ou 50 j	15-20 ans	
France	10-20 m	50-60 j	Intégralité du Bassin hydrographique	
Hollande	10-150 m ou 50-60 j	~800 m. 10 ans	~1200 m 25 ans	Intégralité du Bassin hydrographique (50-100 ans)
Italie	10 m min	200 m min	Intégralité du Bassin hydrographique	
Irlande	100 j ou 300 m	Intégralité du Bassin hydrographique ou 1000 m		
Portugal	20-60 m	40-280 m ou 50 j	50-2400 m ou 3500 j.	Optionnelle, sous forme de zones satellites spéciales
Québec	1-30 m	100 m ou 200 j	200 m ou 550 j	
Royaume-Uni	50 j ou 50 m min	400 j 250-500 m	Intégralité du Bassin hydrographique	
Suisse	10 m	100 m ou 10 j min	Dimension de la 2 <sup>ème</sup> zone doublée	

### 4.4.3 Aspect législatif de la protection des eaux en Algérie

La protection de l'eau se fait tout d'abord par l'établissement de texte législatifs qui règlementent et organisent le secteur de l'eau dans sa globalité. Ainsi des lois et des décrets sont mis en place pour protéger les ressources en eau mobilité et destinées vers la consommation humaine. Dans ce qui suit non passons en revue les différent textes législatifs qui ont touché le secteur l'eau

- ▶ Loi du 16 juillet 1983 porte de code des eaux définit le périmètre de protection comme contour délimitant un domaine géographique et les activités à l'intérieur sont interdites au réglementées.
- ▶ Loi du 4 août 2005 relative à l'eau fixe les principes et les règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau et montre-la nécessité des périmètres de protection contre la pollution.la protection et la préservation des ressources en eau sont assurés par des périmètres de protection quantitative.
- ▶ Des plans de lutte contre l'érosion hydrique.
- ▶ Des périmètres de la protection qualitative.

- ▶ Des mesures de prévention et de protection contre la pollution.
- ▶ Des mesures de prévention de risque d'inondation
  
- ➡ Décret du 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau, cette protection est assurée par trois types de protection.
  - Le périmètre de protection immédiate.
  - Le périmètre de protection rapprochée.
  - Le périmètre de protection éloignée.
  
- ➡ Décret du 6 février 2010 fixant modalités de délimitation de périmètre de protection quantitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau.
  
- ➡ Décret du 25 avril 2012 relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelle et des eaux de source par l'évaluation du périmètre de protection de la ressource.
  
- ➡ Décret du 28 août 2013 relatif aux programmes d'action à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole ; Décret du 4 mars 2014 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine fixe les valeurs pour certain paramètre physico-chimique ;
  
- ➡ En Algérie, la législation dans le domaine est prise en charge par les textes suivants (JORADP N°60 du 04 août 2005 relatif à la loi de l'eau

### 4.4.3.1 Article 38

Il est établi autour des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau souterraine ou superficielle ainsi que de certaines parties vulnérables des nappes aquifères et des oueds, une zone de protection qualitative comprenant, selon les nécessités de prévention des risques de pollution :

Un périmètre de protection immédiate dont les terrains doit être acquis par l'Etat et protégés par une personne physique ou morale chargée de l'exploitation des ouvrages et installations concernés ;

Un périmètre de protection rapprochée à l'intérieur duquel sont interdits ou réglementés les dépôts, activités ou installations susceptibles de polluer les eaux, de façon chronique ou accidentelle ;

Un périmètre de protection éloignée à l'intérieur duquel sont réglementés les dépôts, activités ou installations visés à l'alinéa précédent

### 4.4.3.2 Article 39

A l'intérieur des périmètres de protection qualitative, l'ensemble des activités, y compris les activités agricoles ou industrielles, peuvent être réglementées ou interdites. Peuvent faire l'objet de mesures particulières de contrôle, de restriction ou d'interdiction, les activités concernant notamment :

- ▶ L'installation de canalisations d'eaux usées.
- ▶ L'installation de canalisations, réservoirs et dépôts d'hydrocarbures, de stations-service de distribution de carburant.
- ▶ L'installation de centrales d'asphalte.
- ▶ L'établissement de toutes constructions à usage industriel.
- ▶ Le dépôt de déchets de toutes natures.
- ▶ L'épandage d'effluents et, d'une manière générale, tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité de l'eau, y compris, le cas échéant, les produits destinés à l'agriculture.
- ▶ L'installation et l'exploitation de carrières.

### 4.4.3.3 Article 41

A l'intérieur des périmètres de protection qualitative, l'administration chargée des ressources en eau se réserve le droit d'effectuer, à tout moment et en tout lieu, toute observation, mesure et/ou contrôle destinés à suivre l'évolution qualitative des ressources en eau.

### 4.4.3.4 Article 42

Les indemnités dues aux propriétaires de terrains compris à l'intérieur des périmètres de protection qualitative sont fixées selon les règles applicables en matière d'expropriation pour cause d'utilité publique. A titre comparatif, le Tableau (4.1) donne les différentes procédures établies dans différents pays dans le domaine de la protection des captages d'eau souterraine

# **Chapitre V :**

**Les approches**

**Utilisées pour la**

**Détermination des**

**Périmètres de**

**Protection (PDP)**

### Chapitre 5 : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

#### 5.1 Introduction

L'importance d'un dimensionnement adéquat des PDP est cruciale. En effet, si le PDP ne couvre pas suffisamment la zone à protéger, une contamination de l'ouvrage de captage peut être appréhendée. A l'opposé, si le PDP englobe une trop grande portion du territoire, la gestion optimale de cette zone peut être difficilement assurable.

Ainsi, la principale problématique dans l'établissement des PDP consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination plus réaliste des périmètres pour un minimum d'informations.

Afin d'aider les différents intervenants dans la protection des ouvrages de captage, quelques guides ont été publiés à travers le monde par différents organismes. Notons principalement le guide du United States Environmental Protection Agency (USEPA) publié en 1987 (USEPA, 1987) et réédité en 1994 (USEPA, 1994) ainsi que celui du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de France en 1989 (Lallemand-Barrès et Roux, 1989). Un autre guide portant plus spécifiquement sur la détermination des PDP en milieu fracturé, confiné et semi-confiné a aussi été publié par l'USEPA (USEPA, 1993b) de même qu'un rapport méthodologique portant sur la détermination des PDP des ouvrages de captage par la cartographie hydrogéologique. Au Québec, le MENV a publié en 1995 un guide portant sur l'établissement et la gestion des PDP (MEF, 1995).

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. De façon générale plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise.

Quelques études comparatives visant à valider des méthodes de détermination des PDP ou à démontrer certaines méthodologies ont été menées dans le monde, et principalement aux États-Unis. Les résultats de ces études permettent de tirer des conclusions quant à la capacité de certaines méthodes à déterminer adéquatement les PDP.

Ainsi, Springer et Bair (1992), Barlow (1994) et Forster et al. (1997) démontrent que pour des milieux fortement anisotropes et hétérogènes, l'utilisation de modèles numériques tridimensionnels s'avère essentiel pour une détermination réaliste des PDP,

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

tandis que Bates et Evans (1996) concluent à la nécessité d'utiliser un modèle à double porosité dans des milieux très fracturés et anisotropes. Pour leur part, Livingstone et al. (1996) montrent que la manière d'intégrer dans un modèle la présence d'un cours d'eau situé à proximité d'un puits de pompage peut considérablement affecter la forme des PDP.

Les travaux de Bair et Roadcap (1992) démontrent qu'il est nécessaire d'utiliser un modèle qui puisse tenir compte de l'infiltration verticale et de la variation du champ d'écoulement régional dans un aquifère semi-captif. Finalement, Rama Narayanan et al. (1992) illustrent l'effet de la variation temporelle du débit de pompage d'un puits sur la forme des PDP.

La détermination d'un périmètre de protection des eaux souterraines implique donc d'une part que les conditions hydrogéologiques soient connues et d'autre part que les conditions d'implantation d'une installation de production d'eau potable soient respectées.

### 5.1.1 Délimitation de la zone de protection immédiate (S1)

La zone de protection immédiate englobe le point de prélèvement où les contraintes de pollution sont fortes. Pour la délimitation de cette zone, on utilise la fonction de voisinage (zone tampon) autour des ouvrages à protéger, puis ensuite on procède à des ajustements pour tenir compte de l'occupation du sol et des contraintes locales. Elle doit être acquise en toute propriété et clôturée par l'exploitant et aucune activité polluante n'y est admissible.

Cette zone comprend le captage ou l'installation d'alimentation artificielle, la zone désagrégée par les travaux de forage ou de construction et, au besoin, l'environnement immédiat des installations.

### 5.1.2 Délimitation de la zone de protection rapprochée (S2)

La zone S2 est déterminée en prenant notamment en compte :

- Les caractéristiques physiques de l'aquifère et de l'écoulement souterrain ;
- Le débit maximal de pompage ;
- La vulnérabilité ;
- L'origine et la nature des pollutions contre lesquelles il est nécessaire de protéger les eaux souterraines.

Les notions de base à retenir pour délimiter ce périmètre sont :

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

- ▶ La durée et la vitesse de transfert de l'eau entre les points d'émission de pollutions possibles et le point de prélèvement dans la nappe ;
- ▶ Le pouvoir de fixation et de dégradation du sol et du sous-sol vis-à-vis des polluants ;
- ▶ Le pouvoir de dispersion des eaux souterraines.

La délimitation de cette zone dépend surtout du contexte géologique et hydrogéologique. Elle se trouve en général sur l'isochrone 50 jours (zone correspondant à un temps de transfert de 50 jours, permettant la disparition des bactéries pathogènes).

Le dimensionnement du périmètre de protection rapprochée s'effectue à partir du rayon d'action qui est calculé pour un temps de transfert de 50 jours. En fait, il s'agit de calculer le volume d'eau pompée en 50 jours, qui correspond approximativement à un cylindre.

Le rayon de la surface horizontale de ce cylindre sert de base au dimensionnement du périmètre de protection rapprochée. L'extension du périmètre de protection rapprochée est déterminée par le calcul de l'isochrone 50 j (limite au-delà de laquelle une particule ne peut parvenir au captage dans un délai inférieur à une durée fixée). Elle est directement calquée sur l'aire calculée correspondant au volume prélevé par le captage en 50 jours. L'ajustement final de cette zone est réalisé en tenant compte des différentes contraintes d'occupation du sol.

### 5.1.3 Délimitation de la zone de protection éloignée (S3)

La zone de protection éloignée se situe entre la limite de la zone de protection rapprochée et la limite de l'aire d'alimentation.

Une détermination des aires de protection basée sur les directions d'écoulement et les temps de transport de l'eau reflétant dans la mesure du possible la réalité est essentielle, non seulement pour assurer la protection du prélèvement, mais également parce que la surprotection du prélèvement peut limiter le développement et avoir des conséquences économiques négatives importantes (ex. : acquisition de terrains, cessation d'activités agricoles et perte de revenu, frais supplémentaires liés à l'utilisation d'engrais non organiques, déplacement de pâturages, frais professionnels, etc.).

### 5.2 Critères de délimitation des zones de protection

Les critères utilisés pour délimiter les zones de protection sont généralement au nombre de cinq :

**5.2.1 Distance L'établissement :** des PDP par ce critère repose sur la détermination d'un rayon ou d'une distance mesurée entre l'ouvrage de captage et un point donné de l'aquifère.

Le critère de distance ne tient pas compte des processus d'écoulement et de transport des contaminants. L'utilisation de la distance est basée sur l'expérience acquise dans des contextes hydrogéologiques similaires ou sur le jugement professionnel

**5.2.2 Rabattement :** Il y a rabattement lorsque l'eau souterraine est retirée d'un aquifère par pompage.

L'abaissement du niveau d'eau dans le puits crée un gradient qui entraîne l'eau vers le point de décharge. Ainsi, il se crée un cône de rabattement au voisinage du puits

(Figure 5.1).

La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine augmente à mesure que l'on s'approche du puits, ce qui a pour effet de diminuer le temps d'arrivée d'un contaminant au puits.

Ce critère qui dépend du débit du pompage met l'accent sur deux zones :

- **Zone d'influence**

C'est la distance à partir du puits où les changements du niveau de la nappe peuvent être attribués au pompage.

- **Zone d'appel**

Zone où l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers le captage.

La détermination graphique de cette zone suppose la connaissance de la piézométrie avant et après la réalisation d'un essai de pompage.

Elle consiste à tracer les courbes d'égal rabattement autour du forage ou puits en fonction du débit choisi.

A partir des valeurs de charge hydraulique, on construit la surface piézométrique rabattue par le pompage et le tracé des lignes de courant qui en sera déduit définiront la zone d'appel du captage.

**5.2.3 Limites d'écoulement :** La détermination des PDP basée sur ce critère consiste à utiliser les caractéristiques géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

géochimiques de l'aquifère, ce critère permet de définir la zone de contribution (ZC) ou aire d'alimentation d'un ouvrage de captage (**Figure 5.1**).

Le volume d'eau contenu à l'intérieur de la zone de contribution correspond à la quantité d'eau disponible pour l'ouvrage de captage. Il s'agit de la protection maximale attribuable à un captage.

**5.2.4 Temps de transfert  $t$**  : Le temps de transport est défini par le temps nécessaire à l'eau ou à un contaminant pour se déplacer d'un point d'entrée, à la surface du sol ou dans l'aquifère, jusqu'à son arrivée à l'ouvrage de captage.

À l'intérieur de la zone de contribution du captage on définit des courbes de temps de transport égaux appelées isochrones.

Les aires formées par les différents isochrones sont appelées zones de transport ZT (**Figure 5.1**).

Le temps de transport peut tenir compte du transport en zone non-saturée et en zone saturée.

Généralement, le temps de transport en zone non-saturée est négligé et est utilisé comme coefficient de sécurité.

Généralement, seul le temps de transport advectif est considéré.

Cependant, lorsque la dispersion d'un contaminant est importante le temps de première arrivée devrait être utilisé.

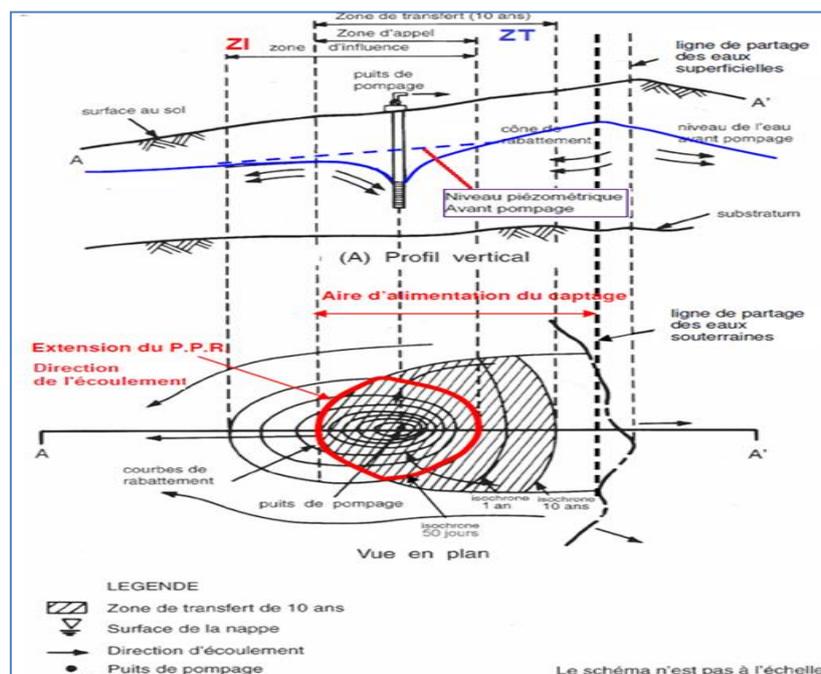


Figure 5.1 : Différentes zones autour d'un ouvrage de captage d'eau souterraine

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

**5.2.5 Capacité d'atténuation du sol :** La capacité d'atténuation des contaminants par le sol permet la réduction des PDP si la concentration du contaminant peut être réduite à un niveau acceptable avant d'atteindre l'ouvrage de captage.

Les aires de protection définies par ce critère sont appelées zones d'atténuation (ZA). S'il n'y a pas d'atténuation, la forme que prend la zone d'atténuation est la même que la zone de transport pour un temps donné s'il y a atténuation la zone aura la même forme que la zone de transport, mais sera plus petite en proportion de l'atténuation du contaminant (**Figure 5.1**).

### 5.3 Les différentes approches

Les méthodes recommandées sont résumées dans le Tableau (**5.1**).

Les approches 1 à 6 sont des méthodes simples tandis que les approches 6 sont plus complexes. Certaines méthodes ne s'appliquent qu'à un type d'aire, par exemple l'aire de protection éloignée seulement, alors que d'autres permettent la détermination toutes les aires.

L'approche par rayon fixe arbitraire (**approche 1**) est appropriée pour l'aire de protection immédiate.

Les méthodes de délimitation nécessitant des calculs (**approches 2 à 6**) sont requises pour les aires de protection intermédiaires et éloignée.

Plusieurs autres méthodes ont été développées. Parmi celles-ci, on peut nommer Méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira et la méthode de Wyssling.

D'autres méthodes pourraient être utilisées.

Il s'agit des méthodes numériques Par exemple celles incorporées dans les logiciels MODFLOW et FEFLOW.

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

**Tableau (5.1) : Les approches recommandées**

Approche	Méthodes	Aires de protection concernées
<b>Approche 1</b>	Rayon fixe arbitraire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Immédiate</li> <li>• Intermédiaires</li> <li>• Éloignée</li> </ul>
<b>Approche 2</b>	Équation du cylindre	• Intermédiaires
	Équation d'infiltration	• Éloignée
<b>Approche 3</b>	Équation du temps de transport	• Intermédiaires
	Équation d'écoulement uniforme	• Éloignée
<b>Approche 4</b>	Krijgsman et Lobo-Ferreira	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éloignée</li> <li>• Intermédiaires</li> </ul>
<b>Approche 5</b>	Wyssling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éloignée</li> <li>• Intermédiaires</li> </ul>
<b>Approche 6</b>	MODFLOW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermédiaires</li> <li>• Éloignée</li> </ul>
	FEFLOW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éloignée</li> <li>• Intermédiaires</li> </ul>

Le choix des méthodes de détermination est fonction des enjeux de protection du prélèvement, ainsi que du milieu naturel, soit de la complexité du système hydrogéologique.

Le gradient hydraulique entre aussi en ligne de compte dans le choix des méthodes. Pour une détermination plus précise, qui devrait être sécuritaire tout en réduisant au minimum les conséquences pour certaines activités encadrées par des règlements à l'intérieur des aires de protection et visant la protection du prélèvement, une étude employant des approches telles que la cartographie hydrogéologique ou la modélisation numérique (**approches 6**) est à privilégier.

De plus, lorsque le système hydrogéologique n'est pas très complexe, les temps de préparation des données d'entrée (ex. : maillage, attribution des propriétés) des modèles et des calculs peuvent être relativement courts. Lorsque les enjeux de protection sont

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

faibles et le système hydrogéologique peu complexe il est possible d'utiliser des méthodes plus approximatives (**approches 2 et 5**).

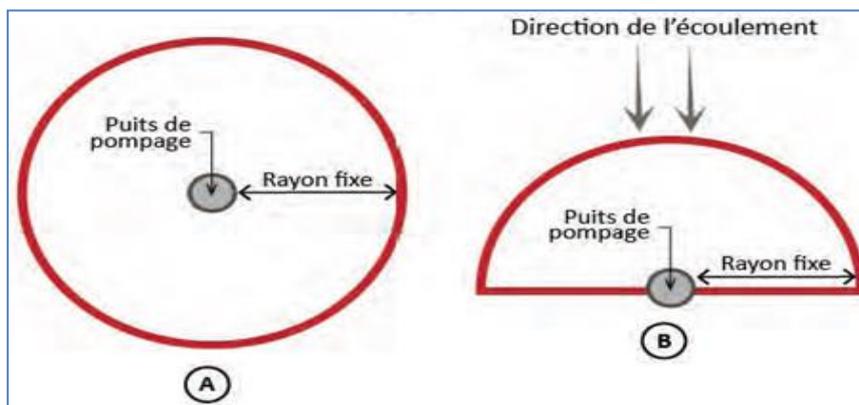
### 5.3.1 Approche 1 : Rayon fixe arbitraire AFR (Arbitrary Fixed Radius).

La méthode AFR consiste à établir un périmètre de protection circulaire de rayon arbitraire autour d'un puits de pompage. La méthode AFR ne tient compte d'aucune variabilité des conditions hydrologiques et l'utilisation de cette méthode risque soit à une surestimation ou à une sous-estimation des PDP.

La méthode du rayon fixe arbitraire consiste simplement à tracer un cercle centré sur le site de prélèvement, de rayon déterminé (**figure 5.2 A**). Cependant, pour l'aire éloignée, seule la portion en amont hydraulique du site de prélèvement doit être tracée, soit un demi-cercle dont le site de prélèvement est situé au foyer de l'arc de cercle

(**Figure 5.2 B**). Pour ce faire, la connaissance de la direction d'écoulement de l'eau souterraine est requise.

Celle-ci peut être déterminée à partir d'une carte piézométrique ou d'au minimum trois mesures de niveau d'eau disposées en triangle dans le voisinage en amont du site de prélèvement. Dans le cas où une incertitude importante demeure sur la direction d'écoulement, la topographie de la surface du sol peut être utilisée. Dans le cas où la topographie est plane, un cercle complet devrait être tracé autour du site de prélèvement.



**Figure (5.2) : la délimitation des aires de protection par rayon fixe arbitraire**  
**A) les aires de protection intermédiaires et les aires de protection immédiates et**  
**B) l'aire de protection éloignée**

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

Certains Règlements sur le prélèvement des eaux et leur protection prescrivent dans la plupart des cas des rayons fixes arbitraires autour des sites de prélèvement d'eau souterraine pour la délimitation des aires de protection (**tableau 5.2**). Le tableau présente les rayons fixes arbitraires prescrits pour chacune des aires de protection.

**Tableau (5.2) : rayons fixes arbitraires autour des sites**

Catégorie du prélèvement	Aire de protection			
	Immédiate	Intermédiaire		Éloignée
		Bactériologique	Virologique	
1	30m	<i>Autre méthode requise</i>	<i>Autre méthode requise</i>	<i>Autre méthode requise</i>
2	30m	100 m	200 m	2km en amont hydraulique
3	3 m	30 m	100 m	Non requis

### 5.3.2 Approche 2 : CFR (Calculated Fixed Radius) ou Méthode du Rayon Fixe Calculé

Les méthodes de calcul de rayon fixes sont des techniques relativement faciles pour tracer une zone de protection circulaire en surface autour de l'ouvrage de captage. Etendre cette idée (méthode de calcul de rayon fixe) à la détermination des périmètres de protection rapproché (PPR) et périmètres de protection éloignée (PPE) donnera lieu à plusieurs erreurs dues à la simplification des paramètres régionaux régissant l'écoulement souterrain. Comme elles tiennent compte des paramètres locaux, elles sont mieux adaptées à la détermination du rayon des périmètres de protection immédiate.

La méthode **CFR** considère deux paramètres fondamentaux : la distance et le temps de transfert (Kraemer et al, 2005). Elle est dite méthode du calcul du rayon fixe parce que le secteur qu'elle décrit en surface a un rayon égal dans toutes les directions (Beach, 2001).

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

Le rayon du cercle correspond à la distance que mettra une particule d'eau, dans un temps donné (temps de transfert), pour arriver au puits. Ce fameux rayon peut être calculé en utilisant l'équation volumétrique ou la loi de Darcy (Ohio EPA, 1994).

La théorie de la méthode CFR prévoit des périmètres sous forme de cercle. La méthode CFR part d'une analyse bidimensionnelle en considérant que l'eau est en équilibre hydrostatique dans l'ouvrage (Kraemer et al., 2005). En effet, l'hypothèse de la symétrie radiale signifie que la limite de recharge d'un ouvrage a probablement une géométrie circulaire autour de celui-ci.

Cette technique considère des cylindres dans la couche aquifère où les rayons de ces cylindres sont fonction du temps de transfert des eaux de la surface du sol au puits (Beach, 2001) (Figure 5.3 et figure 5.4).

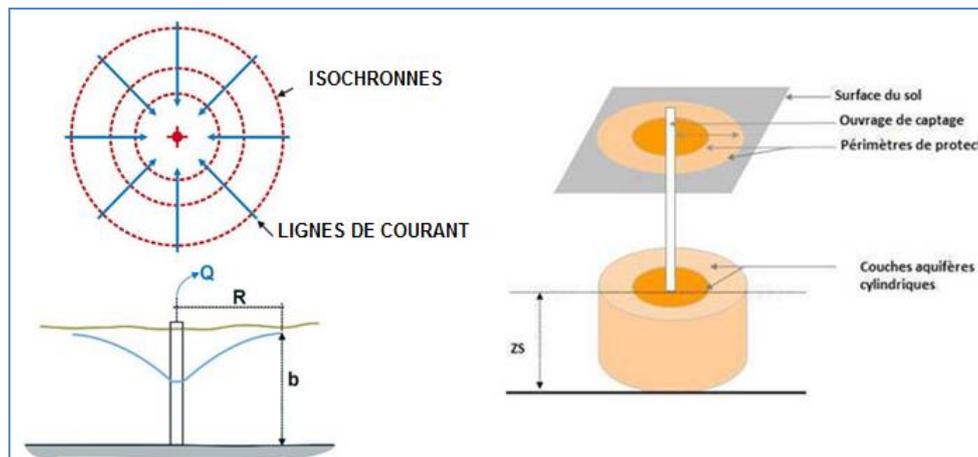


Figure (5.3) : Couches aquifères cylindriques limitées par les isochrones (Beach, 2001).

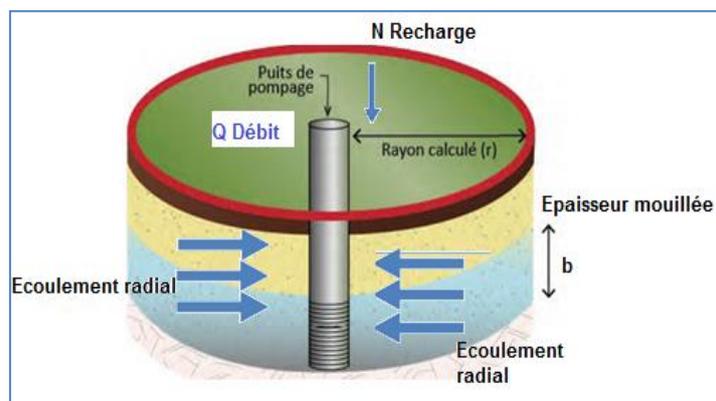


Figure (5.4): Illustration des trois valeurs à utiliser dans l'équation volumétrique pour la détermination du rayon. (Ohio EPA, 1994).

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

La superficie des aires de protection peut être calculée. Les données nécessaires sont :

- ▶ Débit journalier moyen d'exploitation (Q)
- ▶  $b$  = épaisseur mouillée (en mètre),
- ▶ Porosité efficace ( $n_e$ ) – pour les aires de protection intermédiaires seulement
- ▶ Recharge (R) – pour l'aire de protection éloignée seulement

### 5.3.2.1 Équation Volumétrique

Considérons une surface plane. A un certain rayon tout autour du puits sur cette surface il existe une zone où toute l'eau d'infiltration entre dans un volume cylindrique de l'aquifère. En comparant la zone de contribution du puits de pompage à un cylindre, la zone de la contribution peut être décrite comme suit :

$$Qt_x (\text{volume pompé}) = n_e \pi b r^2 (\text{volume du cylindre}) \quad (5.1)$$

Où :

- ▶  $Q$  = débit maximum ( $m^3 / \text{année}$ )
- ▶  $t_x$  = temps pour  $x$  années (en années),
- ▶  $b$  = épaisseur mouillée (en mètre),
- ▶  $n_e$  = porosité de couche aquifère (en pourcentage).

L'équation volumétrique exige trois valeurs:

- ▶ Le volume de l'eau a pompé,
- ▶ Porosité de la couche aquifère,
- ▶ L'épaisseur mouillée de la nappe.

Dans cette équation nous pouvons tirer la valeur du rayon ( $r$ ) du cylindre, qui est équivalent au rayon d'un secteur circulaire de temps de transfert d'une certaine durée  $t$

$$r = \sqrt{\frac{Qt}{n_e \pi b}} \quad (5.2)$$

La superficie de l'aire de protection (ex. : en  $m^2$ ).

$$Sup = \frac{Qt_x}{bn_e}$$

En tenant compte du débit de pompage, de la recharge régionale de la nappe, de la porosité de l'aquifère et de l'épaisseur saturée dans l'ouvrage, l'état d'équilibre se traduit par la relation (KOUAME, et al, 2013) :

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

$$R\pi r^2 t + n_e \pi r^2 H = Qt \quad (5.3)$$

Où:

- ▶ R : recharge de la nappe (m/an) ;
- ▶ t : Temps de transfert des eaux souterraines
- ▶  $N\pi r^2 t$  : apports d'eau dû à la recharge de l'aquifère ( $m^3$ )
- ▶  $n\pi r^2 b$  volume d'eau contenu dans la couche aquifère cylindrique ( $m^3$ )

Le rayon r de la couche aquifère cylindrique exprimé en fonction de l'isochrone de temps de transfert t est :

$$r = \sqrt{\frac{Qt_x}{R\pi t + n_e \pi b}} \quad (5.4)$$

Où :

- ▶ Q est le débit journalier moyen d'exploitation (ex. : en  $m^3$ /jour),
- ▶ t est le temps donné (ex. : 200 jours pour l'aire de protection bactériologique 550 pour l'aire de protection virologique), r est le rayon calculé (ex. : en m),
- ▶ b est la longueur de la crépine (ou de l'ouverture du puits dans le roc) (ex. : en m) ;
- ▶  $n_e$  est la porosité efficace du matériau qui constitue l'aquifère (adimensionnel)
- ▶ Sup est la superficie de l'aire de protection (ex. : en  $m^2$ ) ;
- ▶ r est le rayon calculé (ex. : en m) ;
- ▶ R est la recharge de l'aquifère (ex. : en mm/an).

Dans cette relation, lorsque l'apport dû à la recharge régionale est faible ce terme peut être négligé relation. En Général, c'est lorsque nous disposons d'une nappe captive d'épaisseur b que nous négligeons la recharge. Supposons le cas où la recharge annuelle est de l'ordre de 407mm par an soit  $1,115.10^{-3}$  mètre par jour (Boukari, 1998). Le terme représentant l'apport dû à la recharge de l'aquifère ( $\pi N t$ ) est donc négligeable devant le terme ( $\pi n b$ ) . On obtient la relation:

- ▶ Si nous considérons le temps de transfert de 50 jours, nous aurons le rayon du PPR suivant

$$r = 4 \sqrt{\frac{Q}{n_e b}} \quad (5.5)$$

- ▶ Si nous considérons le temps de transfert de 3500 jours, nous aurons le rayon du PPE suivant:

$$r = \sqrt{\frac{3500 \cdot Q}{n_e \pi b}} \quad (5.6)$$

### 5.3.2.2 Équation De Darcy

On utilise la loi de Darcy pour déterminer l'écoulement qui traverse un milieu poreux. L'équation de Darcy nous donne une idée sur la vitesse des eaux souterraines traversant la couche aquifère. Pour déterminer le rayon fixe en utilisant la loi de Darcy nous devons connaître au préalable trois valeurs (Ohio EPA, 1994):

- ▶ La conductivité hydraulique de la couche aquifère (m/s),
- ▶ Le gradient hydraulique (sans unité),
- ▶ La porosité efficace du matériel de couche aquifère (sans unité).

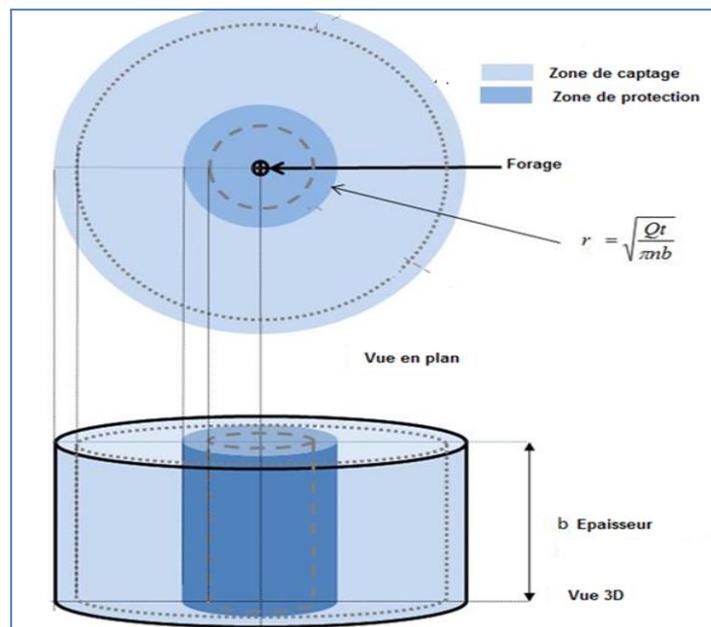
La loi de Darcy est écrite comme suit en tenant compte des vides efficaces

$$v = \frac{ki}{n_e} \quad (5.7)$$

Où :

- ▶  $v$  : la vitesse d'écoulement des eaux souterraines (m/s),
- ▶  $K$ : la conductivité hydraulique (m/s),
- ▶  $I$  : le gradient hydraulique (sans unité),
- ▶  $n_e$  : la porosité effective (sans unité).

La méthode du rayon fixe calculé est illustrée par la figure (5.5).



**Figure (5.5) : la délimitation des aires de protection par rayon fixe calculé par  
l'équation du cylindre.**

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

### 5.3.2.3 Méthode d'infiltration

Cette méthode est utilisée dans ce travail pour déterminer le rayon amont du périmètre de protection éloigné (PPE). Le rayon aval de ce périmètre étant déjà déterminé par les solutions de l'équation uniforme d'écoulement.

Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an et le volume de la recharge moyenne annuelle de la nappe.

Dans le cas d'un puits unique, la zone de recharge est assimilée à un cercle de superficie  $A$  et de rayon  $R$  (KOUAME, et al, 2013). Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an et le volume de la recharge moyenne annuelle dans la zone d'alimentation du captage à protéger. La zone de recharge est assimilée à un cercle de superficie  $A$  et de rayon  $R$ . On a :

$$Q = \pi r^2 N \quad \text{d'ou } r = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}} \quad \text{et } A = \frac{Q}{N} \quad (5.8)$$

Avec :

- ▶  $A$  : surface du cercle ( $m^2$ ) équivalente à l'aire de recharge de la nappe ( $=\pi r^2$ )
- ▶  $r$  : rayon de l'aire de recharge de la nappe (m) ;
- ▶  $Q$  : débit maximum prélevé dans la nappe ( $m^3 \cdot an^{-1}$ ) ;
- ▶  $N$  : recharge de la nappe ( $m \cdot an^{-1}$ ) équilibrant le débit  $Q$  prélevé dans le captage.

Le rayon ne dépend pas du temps de transfert  $t$ , donc il reste constant et est assimilé au rayon de la zone de recharge de l'aquifère alimentant le captage. Les périmètres déterminés par cette méthode seront des PPE.

### 5.3.3 Approche 3 : Équations analytiques (Equation d'écoulement uniforme)

L'équation d'écoulement uniforme définit la zone d'appel d'un pompage. La résolution de cette équation exige la connaissance de quatre données (Ohio EPA, 1994):

- ▶ Le débit du pompage  $Q$ ;
- ▶ La conductivité hydraulique de la couche aquifère  $K$ ;
- ▶ L'épaisseur saturée de la couche aquifère  $b$ ;
- ▶ Gradient hydraulique régional  $i$ .
- ▶ Porosité efficace ( $n_e$ )

L'équation d'écoulement uniforme est plus précise que les méthodes de calcul de rayon fixe (équation volumétrique) parce qu'elles tiennent compte du gradient hydraulique

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

régional, alors que les méthodes de calcul de rayon fixe assument une surface équipotentielle horizontale (OHIO, 1994).

L'équation générale représentant la limite de l'aire d'alimentation est la suivante :

- Pour un aquifère à nappe captive :

$$-\frac{y}{x} = \tan \left[ \frac{k2\pi bi}{Q} * y \right] \quad (5.9)$$

- Pour un aquifère à nappe libre :

$$-\frac{y}{x} = \tan \left[ \frac{k\pi(h_1^2 - h_2^2)}{Q\Delta l} * y \right] \quad (5.10)$$

Où :

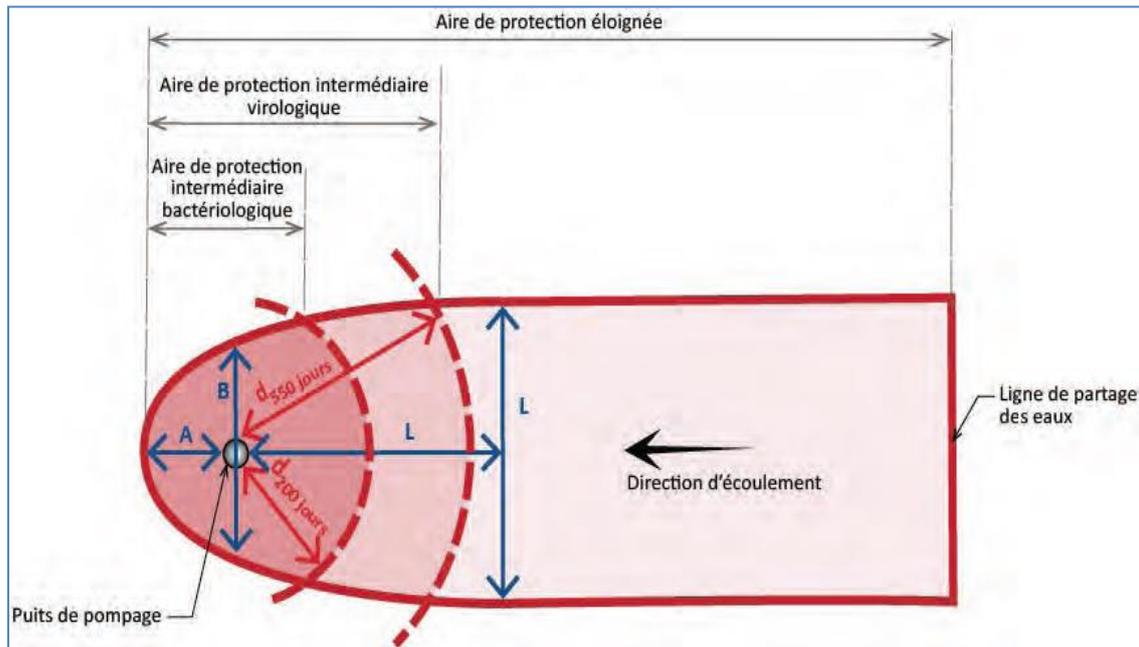
- ▶ x et y sont des coordonnées spatiales,
- ▶ K est la conductivité hydraulique de l'aquifère (ex. : en m/jour),
- ▶ Q est le débit journalier moyen d'exploitation (ex. : en m<sup>3</sup>/jour),
- ▶ b est l'épaisseur saturée de l'aquifère (ex. : en m),
- ▶ i est le gradient hydraulique de l'aquifère (adimensionnel),
- ▶ h1 et h2 sont les charges hydrauliques amont et aval (ex. : en m),
- ▶ Δl est la distance entre ces deux points,

L'aire d'alimentation est de forme quasi parabolique (**Figure 5.6**), ayant le site de prélèvement comme foyer, s'étendant sur une distance (**A**) en aval du puits, d'une largeur (**B**) à la hauteur du puits et d'une largeur maximale (**L**) atteinte à une même distance (**L**) en amont (**A**). Au-delà, l'aire d'alimentation se prolonge à une largeur constante (**L**) jusqu'à la ligne de partage des eaux souterraines.

La distance à un temps donné doit être calculée en résolvant l'équation par essais et erreurs. Pour un temps donné, la distance est déterminée en amont sur un axe parallèle à la direction d'écoulement dans l'aquifère.

Cette distance correspond à l'arc de cercle dont le foyer est le site de prélèvement et dont les limites latérales sont l'aire d'alimentation.

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)



**Figure (5.6) : la délimitation des aires de protection par méthodes analytiques pour les aires de protection intermédiaires et éloignée**

La définition des paramètres adimensionnels diffère selon le type d'aquifère rencontré. Pour un aquifère captif, Bear et Jacobs (1965) utilisent les formulations suivantes :

$$x_d = \frac{2\pi k b i}{Q} x, \quad y_d = \frac{2\pi k b i}{Q} y, \quad t_d = \frac{2\pi b (k i)^2}{n_e Q} t;$$

$$\text{et } \theta = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (5.11)$$

Pour un aquifère en nappe libre, Grubb (1993) a démontré que les formulations précédentes étaient applicables, à condition d'utiliser comme définition de l'épaisseur saturée  $b = (h_1 + h_2) / 2$ , et comme définition du gradient hydraulique

$$i = (h_1 - h_2) / L, \text{ où :}$$

- ▶  $h_1$  et  $h_2$  sont les charges hydrauliques amont et aval le long d'une ligne de courant avant la mise en pompage;
- ▶  $L$  est la distance entre ces deux points.

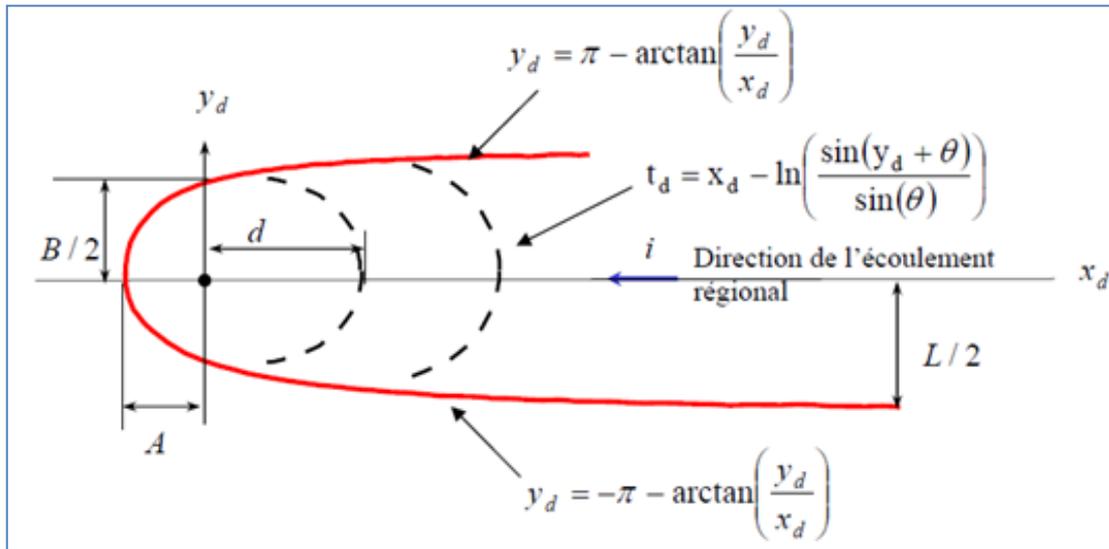
Cela donne comme paramètres adimensionnels :

$$X_d = \frac{\pi k (h_1^2 - h_2^2)}{Q \Delta l} x \quad \text{et} \quad Y_d = \frac{\pi k (h_1^2 - h_2^2)}{Q \Delta l} y \quad (5.12)$$

$$t_d = \frac{\pi((h_1+h_2))\left[k\frac{(h_1-h_2)}{\Delta l}\right]^2}{n_e Q} \quad \text{et} \quad \theta = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (5.13)$$

Il est possible de se contenter de déterminer les distances suivantes (**figure 5.7**) :

- Distance entre la limite aval de la zone d'appel et l'ouvrage de captage (A);
- Largeur maximale de l'aire d'alimentation (L);
- Largeur de la limite d'alimentation au droit du puits (B);
- Distance du puits à l'isochrone considérée (d), selon l'axe des abscisses

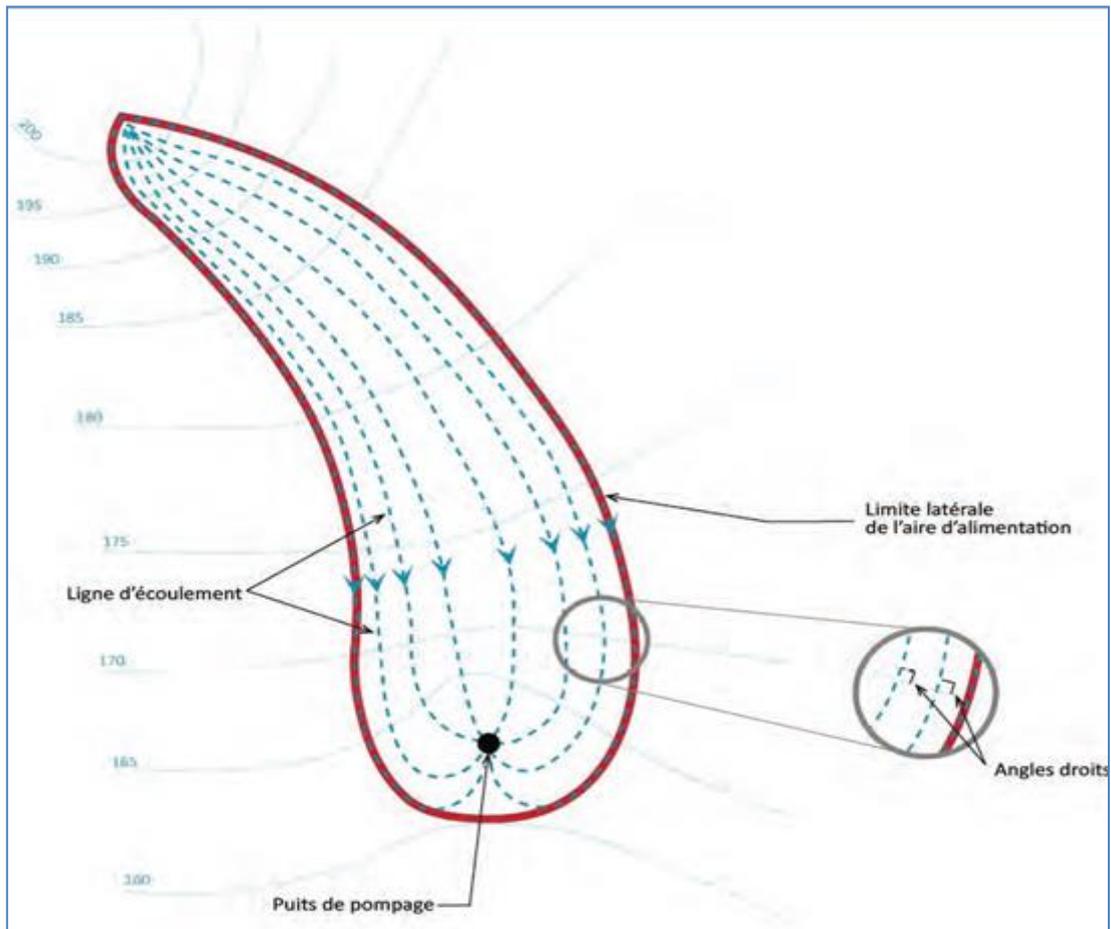


**Figure (5.7) : Représentation de l'aire d'alimentation et des isochrones déterminées**

Le périmètre de protection au temps  $t$  est alors déterminé par l'arc de cercle de rayon  $d$  centré au puits, jusqu'à son intersection avec l'aire d'alimentation.

### 5.3.4 Approche 4 : cartographie hydrogéologique

La cartographie hydrogéologique permet de déterminer l'aire d'alimentation en définissant les limites d'écoulement hydraulique d'un aquifère. Le traçage inverse d'une particule d'eau peut être effectué, depuis l'installation de prélèvement jusqu'à la ligne de partage des eaux souterraines. Lorsque les propriétés hydrauliques sont isotropes, les lignes d'écoulement recoupent les isopièzes (courbes de même niveau piézométrique) perpendiculairement (**figure 5.8**). Les particules aux extrémités latérales de l'aire d'alimentation indiquent les limites de celle-ci.



**Figure (5.8): la délimitation de l'aire d'alimentation par traçage inverse d'une particule d'eau depuis l'installation de prélèvement jusqu'à la limite amont de l'aire d'alimentation**

La méthode de cartographie hydrogéologique requiert généralement beaucoup de données et d'expertises techniques. Pour ces raisons, il est invraisemblable qu'une petite communauté avec des moyens financiers limités puisse l'utiliser. Par ailleurs, lorsque des fonds sont disponibles pour l'obtention des données nécessaires et d'expertise technique, la cartographie hydrogéologique est recommandée.

Afin d'obtenir une carte piézométrique, il faut procéder à l'interpolation des niveaux d'eau disponibles pour estimer la surface entre les points de mesure.

Plusieurs méthodes d'interpolation, qui varient selon leur complexité et le nombre de données nécessaires, peuvent être employées, telles que la triangulation, les voisins naturels ou le krigeage. Celles-ci sont généralement disponibles dans les systèmes d'information géographiques et sont détaillées dans plusieurs ouvrages de référence

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

(Isaaks et Srivastava, 1989). Lorsque les données sont peu nombreuses, une méthode interprétative « à la main » faisant appel au jugement professionnel peut être plus pertinente qu'une méthode automatisée. D'autres informations du milieu, telles que la topographie et la présence de cours d'eau, pourront ainsi être intégrées dans la réalisation de la carte piézométrique.

### 5.3.5 Approche 5 : Méthodes numériques

Les modèles numériques permettent d'obtenir une solution approximative des équations mathématiques représentant la physique du problème (dans ce contexte, l'écoulement de l'eau souterraine), à partir de paramètres hydrogéologiques. Ils peuvent servir à déterminer à la fois les aires de protection intermédiaires et éloignée. La modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine simule les charges hydrauliques ainsi que les vitesses d'écoulement, typiquement en régime permanent. Les aires de protection sont déterminées à partir des champs de vitesses, en utilisant la méthode de traçage de particules (la méthode courante), ou avec un modèle de transport advectif-dispersif (basé sur la probabilité de captage).

L'utilisation des modèles numériques pour déterminer les PDP se fait généralement en deux étapes.

1. La première étape consiste à calibrer le modèle numérique d'écoulement. Pour ce faire, on doit d'abord:
  - ▶ Définir les limites, imposer les sollicitations et discrétiser le modèle par un maillage ou un réseau d'éléments;
  - ▶ Imposer les propriétés hydrauliques de l'aquifère et
  - ▶ Calibrer le modèle par ajustement des paramètres avec des charges et des débits mesurés.
2. La seconde étape consiste à calculer les PDP à l'aide d'un modèle numérique de transport ou d'un algorithme de traçage de particules utilisant le modèle numérique d'écoulement calibré précédemment. Cette seconde étape peut aussi être subdivisée :
  - ▶ Imposer les paramètres de transport et/ou les particules et
  - ▶ Tracer les lignes d'écoulement.

De nombreux modèles numériques sont disponibles et diffèrent par le type de solution utilisé pour l'approximation. Les deux modèles les plus couramment utilisés sont

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

MODFLOW-MODPATH et FEFLOW. D'autres modèles sont tout aussi pertinents et pourraient être employés. Les modèles numériques sont particulièrement utiles pour déterminer les PDP lorsque les limites et le contexte hydrogéologique sont très complexes. Ces modèles sont généralement très flexibles et permettent la représentation de tous les paramètres d'écoulement et de transport. Ces modèles donnent généralement un bon degré de précision et peuvent aussi être utilisés pour prédire la dynamique des PDP résultantes de causes naturelles ou humaines.

### 5.3.6 Approche 6 : Méthode Krijgsman & Lobo-Ferreira

La méthode élaborée par Krijgsman et Lobo-Ferreira est basée sur les relations analytiques développées par Kreidler et Senger, modifiée par Bear et Jacobs en 1965. Si une contamination est détectée dans une zone de surveillance, elle pourrait être traitée avant qu'elle entre dans le puits (Krijgsman al., 2001). Cette méthode permet de déterminer les valeurs du temps de transfert sur une surface donnée à partir des solutions d'une équation analytique. Les solutions de cette équation nous donnent les rayons du périmètre de protection rapprochée (PPR) qui doivent couvrir la zone d'appel des ouvrages en considérant un temps de transfert de 50 jours.

Dans le manuel "Ground Water and Wellhead Protection" (EPA, 1994 page 76) l'équation suivante peut être trouvée:

$$t_x = \frac{n_e}{ki} \left[ r_x - \left( \frac{Q}{2\pi kbi} \right) \ln \left[ 1 + \left( \frac{2\pi kbi}{Q} \right) r_x \right] \right] \quad (5.14)$$

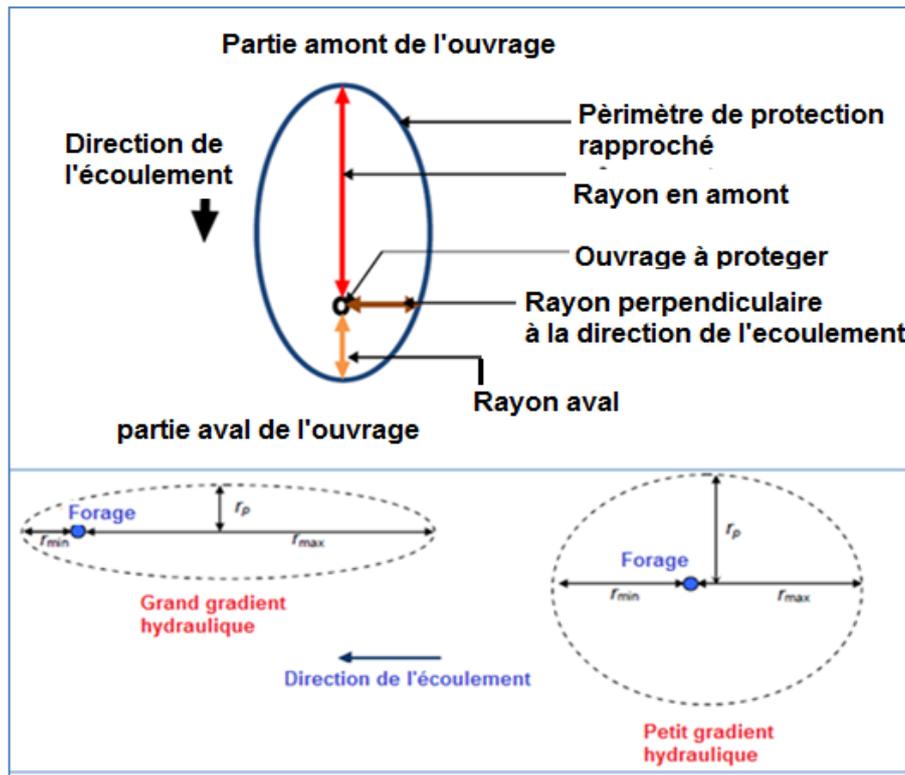
Où:

- ▶  $t_x$  : temps de transfert (jour) ;
- ▶  $n$  : porosité de l'aquifère ;
- ▶  $K$  : conductivité hydraulique (m/j) ;
- ▶  $Q$  : débit de pompage (m<sup>3</sup>/j) ;
- ▶  $b$  : épaisseur de l'aquifère (m) ;
- ▶  $i$  : gradient hydraulique ;
- ▶  $r_x$  : rayon délimitant une surface suivant l'isochrone de temps de transfert  $t_x$  (m).

En utilisant cette méthode, on peut donner rapidement et sans trop d'effort des gammes de périmètres des zones de protection requises. Cette méthodologie est à utiliser dans aquifères libres, et ce vu leurs vulnérabilités directes à la pollution. Selon Krijgsman &

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

Lobo-Ferreira (2001), la zone de protection de 50 jours à une forme en forme d'ellipse qui ressemblera plus à un cercle lorsque le gradient hydraulique est plus petit. Les auteurs proposent l'utilisation de trois équations pour calculer les dimensions des trois distances de protection de la zone intermédiaire ( $r_{max}$ ,  $r_{min}$  et  $r_p$ ) (Figure 5.9).



**Figure (5.9) : Zone de protection intermédiaire dans des situations extrêmes du grandirent hydraulique**

Les équations qui suivent, sont développées par KRIJOSMAN et LOBO-Ferreira (2001) visant à déterminer les distances de protection de l'ouvrage en amont et en aval. Les solutions analytiques de l'équation :

$$r_{max} = r_{amont} = \frac{0,00002x^5 - 0,0009x^4 + 0,015x^3 + 0,37x^2 + x}{F} \quad (5.15)$$

$$r_{min} = r_{aval} = \frac{0,042x^3 - 0,37x^2 + 1,04x}{F} \quad (5.16)$$

$$avec \ x = \sqrt{\frac{2Ft}{A}} = 2ki \sqrt{\frac{\pi bt}{Qn_e}} \quad et \quad F = 2\pi kbi/Q$$

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

$$r_p = r_{\text{perpendiculaire}} = 4 \sqrt{\frac{Qt}{nb}} \quad (5.17)$$

En fonction du degré de confinement et de la typologie du système aquifère, six types d'aquifère ont été considérés (Krijgsman et Lobo-Ferreira en,2001) :

- Type 1 : Système aquifère poreux et confiné ou nappe captive ;
- Type 2 : Système aquifère poreux non confiné ou nappe libre ;
- Type 3 : Système aquifère poreux semi confiné ou nappe semi captive ;
- Type 4 : Aquifère graveleux ou aquifère constitué de formations carbonatés (calcaire) ;
- Type 5 : Système aquifère constitué de formation ignées ou métamorphiques fissurées ;
- Type 6 : Système aquifère constitué de formations ignées ou métamorphiques peu fissurée ;

Les rayons des périmètres de protection sont fixés en fonction de ces différents systèmes d'aquifère (**Tableau 5.3**) (Krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001).

**Tableau 5.3 : les valeurs minimales utilisées dans la méthode du calcul CFR pour la délimitation des périmètres de protection (krijgsman et Lobo-Ferreira,2001)**

Types d'aquifère	Périmètre immédiate	Périmètre rapproché(t= 50 j)	Périmètre éloigné (t = 3500 jours )
<b>Type 1</b>	r = 20 m	40 m ≤ r ≤ r <sub>1</sub>	350 m ≤ r ≤ r' <sub>1</sub>
<b>Type 2</b>	r = 40 m	60 m ≤ r ≤ r <sub>2</sub>	500 m ≤ r ≤ r' <sub>2</sub>
<b>Type 3</b>	r = 30 m	50 m ≤ r ≤ r <sub>3</sub>	400 m ≤ r ≤ r' <sub>3</sub>
<b>Type 4</b>	r = 60 m	280 m ≤ r ≤ r <sub>4</sub>	2400 m ≤ r ≤ r' <sub>4</sub>
<b>Type 5</b>	r = 60 m	140 m ≤ r ≤ r <sub>5</sub>	1200 m ≤ r ≤ r' <sub>5</sub>
<b>Type 6</b>	r = 40 m	60 m ≤ r ≤ r <sub>6</sub>	500 m ≤ r ≤ r' <sub>6</sub>

### 5.3.7 Approche 7 : La méthode de Wyssling

En 1979, L. Wyssling a mis au point une formule mathématique qui peut servir à délimiter les zones de protection autour des captages d'eaux souterraines.

Elle permet en effet de calculer directement la durée d'écoulement (temps de séjour) des eaux souterraines à partir d'un point quelconque situé sur l'axe d'écoulement

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

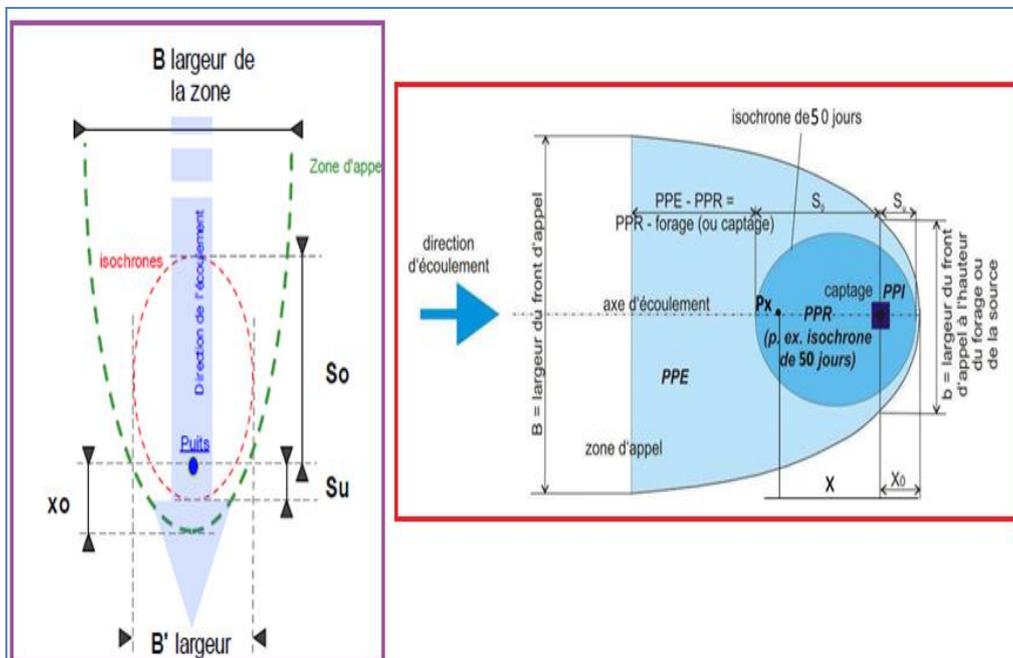
jusqu'au puits en service. Relativement simple et valable dans la pratique, ce calcul se fonde sur de longues années d'expérimentations.

En l'appliquant, on pose comme hypothèse de base que les conditions régnant dans l'aquifère sont plus ou moins homogènes et que le débit prélevé ( $Q$ ) est nettement inférieur au débit total de la nappe souterraine.

Cette méthode permet de calculer les grandeurs suivantes :

- Le rayon d'appel pour un débit d'exploitation donné, soit la distance séparant le puits du point de stagnation aval ;
- La largeur du front d'appel à la hauteur du puits et en amont de celui-ci ;
- La distance mesurée sur l'axe d'écoulement et correspondant à un temps de séjour donné, en amont et en aval du puits ;
- Le temps de séjour (jours) entre un point déterminé de l'axe d'écoulement jusqu'au puits.

Elle consiste à calculer à la fois la zone d'appel et le temps de transfert en tenant compte du contexte hydrogéologique ou intervenant les caractéristiques transmissivité  $T$ , perméabilité  $K$ , porosité efficace (**Figure 5.10**)



**Figure (5.10) : Illustration de la méthode de Wyssling**

Les données utilisées sont les suivantes :

- $b$  = épaisseur de l'aquifère en mm
- $K$  = perméabilité en m / s

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

---

- ▶ I= gradient d'écoulement de la nappe
- ▶ w=porosité efficace
- ▶ Q=débit du puits m<sup>3</sup>/s

Dans un premier temps, on détermine la zone d'appel par le calcul.

- ▶ B est la largeur du front d'appel :  $B = \frac{Q}{kbi}$
- ▶ la largeur du front d'appel à hauteur du captage :  $B' = B/2 = Q/(2Kbi)$
- ▶ le rayon d'appel est :  $X_0 = \frac{Q}{2\pi kbi}$
- ▶ la vitesse effective est :  $v = \frac{ki}{n_e}$

Une fois déterminée, il est possible de déterminer l'isochrone 50 jours, c'est à dire la distance correspondant à un temps de transfert d'une éventuelle pollution d'une durée de 50 jours. Ce délai de 50 jours permet de mettre en place des mesures d'intervention en cas de pollution 50 jours. Cette distance est calculée par les formules suivantes :

$$S_0 = \frac{L + \sqrt{L(L+8X_0)}}{2} \qquad S_U = \frac{-L + \sqrt{L(L+8X_0)}}{2} \qquad (5.18)$$

Avec :  $L = v * t$

- ▶ S<sub>0</sub> : Distance en amont du captage depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps de transfert t souhaité en m.
- ▶ S<sub>U</sub> : Distance en aval du captage ; sur l'axe d'écoulement depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaitée.  $L = v * t$

Longueur de l'ellipse qui représente l'isochrone :  $L_0 = 2a = 2 * \frac{S_0 + S_u}{2}$

La largeur de l'ellipse qui représente l'isochrone  $L_a = 2\sqrt{a^2 - (a - S_u)^2}$

Une fois que les grandeurs B, X<sub>0</sub>, b, S<sub>0</sub>, S<sub>U</sub>, sont connues, on procède à la détermination des périmètres de protection. Le PPR est défini comme l'isochrone de 50 jours, portera une forme d'ellipse. Le PPE prendra une forme parabolique avec une longueur du grand axe équivalente à X<sub>0</sub>+2S<sub>0</sub>. Le tableau suivant regroupe les grandeurs nécessaires pour la détermination des périmètres de protection

## Chapitre V : Les approches utilisées pour la détermination des périmètres de protection (PDP)

**Tableau (5.4) : Les grandeurs et les formules correspondantes**

Dimensions	Formules
Largeur du front d'appel pour un forage	$B = \frac{Q}{kbi}$
la largeur du front d'appel à hauteur du captage :	$B' = B'/2 = Q/(2Kbi)$
Le rayon d'appel pour un forage	$X_0 = \frac{Q}{2\pi kbi}$
La vitesse effective	$v = \frac{ki}{n_e}$
La longueur limite	$L = v * t$
La distance en amont du captage	$S_0 = \frac{L + \sqrt{L(L + 8X_0)}}{2}$
La distance en aval du captage	$S_u = \frac{-L + \sqrt{L(L + 8X_0)}}{2}$
Longueur de l'ellipse qui représente l'isochrone	$L_0 = 2a = 2 * \frac{S_0 + S_u}{2}$
La largeur de l'ellipse qui représente l'isochrone	$L_a = 2\sqrt{a^2 - (a - S_u)^2}$

**Chapitre VI :**  
**Présentation**  
**de La zone**  
**D'étude**

### Chapitre 6 : Présentation de La zone d'étude

#### 6.1 Situation Géographique de la zone d'étude

La source de Bekkaria, connue sous le nom Ain El Khanga, est située à la zone limitrophe ; précisément à la ligne de partage des eaux, de deux grands sous bassins versant voisins

(Figure 6.1):

- ➔ Le sous bassin versant de Tébessa.
- ➔ Le sous bassin versant d'El Malabiod.

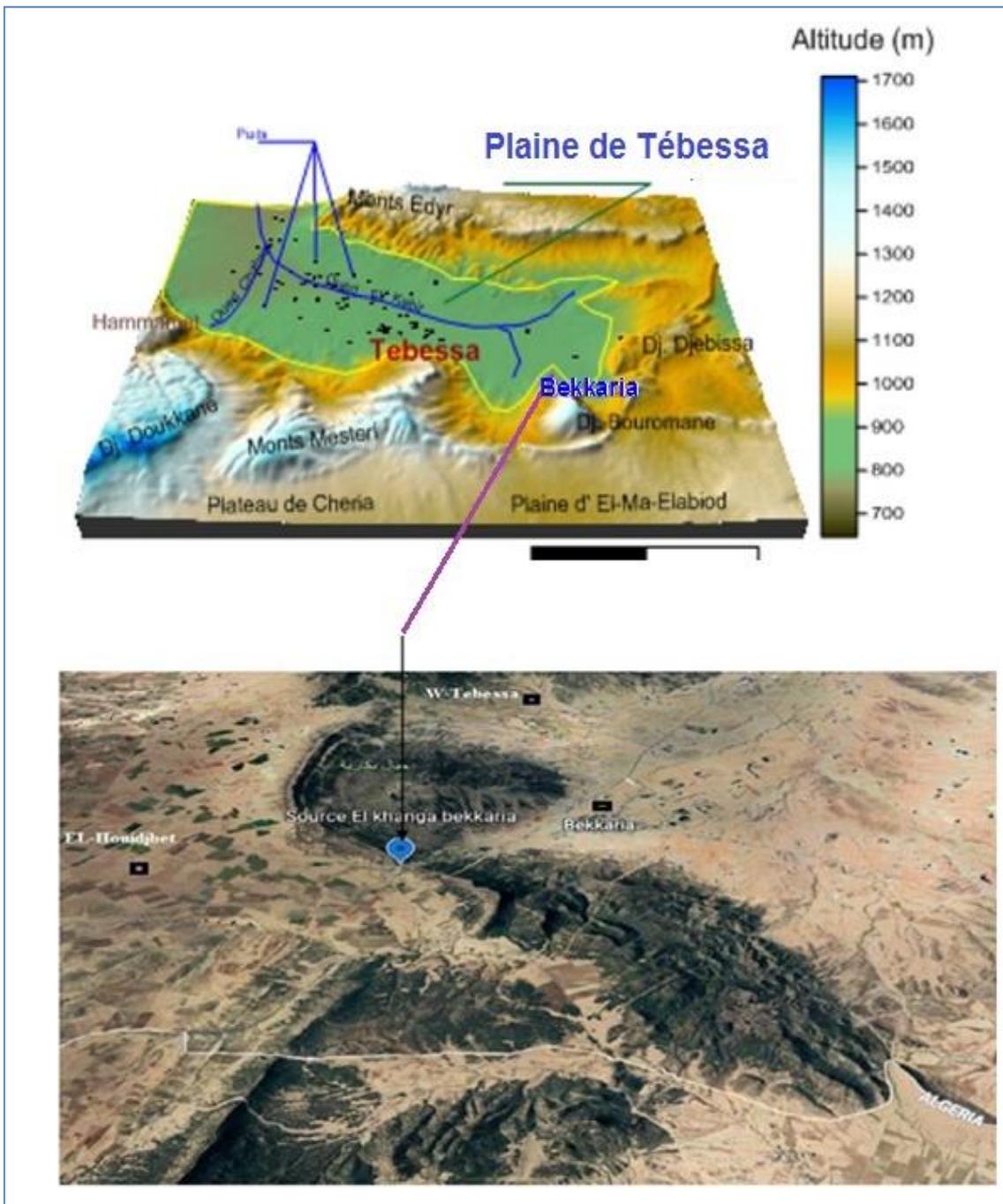


Figure (6.1) : La zone d'étude Bekkaria

## Chapitre VI : Présentation de la zone d'étude

---

Considérée comme exutoire Nord de la nappe alluviale du bassin d'El Malabiod, la source de Bekkaria se localise à mi-chemin de la route nationale N°10 liant Tébessa- Bouchebka, à 20 km de la ville de Tébessa, elle prend naissance, en amont à Ain Dokkara de la colline de Hadjra sefra, et s'allonge, en aval, sur un petit cours d'eau de 2000 m de distance pour atteindre le col de Djbel Bekkaria - Djbel Sif Bouroumane. Elle a les coordonnées Lambert :  $X = 1005,15 \text{ km}$   $Y = 241.73 \text{ Km}$ .  $Z = 1033\text{m}$ .

De point de vue usage, les eaux de la source sont captées par un long canal très étroit, en forme de rigole, de 0.50 m de largeur, pour irriguer en aval les petits champs et parcelles maraîchères de la commune de Bekkaria situé dans le sous bassin versant de Tébessa. La zone juste limitrophe de la source en étude est nommée Elhoudjbet. De point de vue géomorphologique, la région d'étude se trouve dans les hauts plateaux et se limite :

- Au Nord par Dj.Kechrid (1205m) et Dj.Bekkaria (1575m) ;
- Au Sud par Dj.Ettaga (1345m), Dj.Ezaaba (1227m), et Dj.Chettabya (1311m) ;
- A l'Est par le triangle frontalier d'Ain Bouderies juste derrière le poste frontalier de Bouchebka ;
- A l'Ouest par Mechtatt Benmeriem, Dj.Edalaa (1308m) et Hadjra safra (1179m).

L'étude des caractéristiques hydro-climatologique de l'ensemble d'un bassin versant en particulier la zone d'étude, joue un rôle important dans la reconnaissance du comportement hydrologique des cours d'eau ; les précipitations et les températures, sont les facteurs les plus importants dans l'identification du régime d'écoulement ; elles conditionnent soit la sécheresse, soit l'humidification du milieu. Concernant le secteur d'étude, les différentes données sont recueillies au niveau de la station climatique de la région d'el khanga (Bekkaria).

Ces données sont regroupées dans **le tableau (6.1)**, et ce pour la période (1998-2018)

Tableau (6.1) : les températures et les précipitations de la zone d'études

Mois	T [° C]	P[mm]
Septembre	19,68	22,34
Octobre	15,21	23,55
Novembre	9,32	23,37
Décembre	5,66	28,7
Janvier	4,42	33,67
Février	5,69	27,85
Mars	8,24	26,45
Avril	11,33	25,76
Mai	16,36	20,42
Juin	21,34	19,1
Juillet	24,39	10,38
Août	23,62	18,79
<b>Somme</b>		<b>280,38</b>

Ces données sont représentées graphiquement, et ce pour permettre une meilleure interprétation (Figure 6.2 et 6.3)

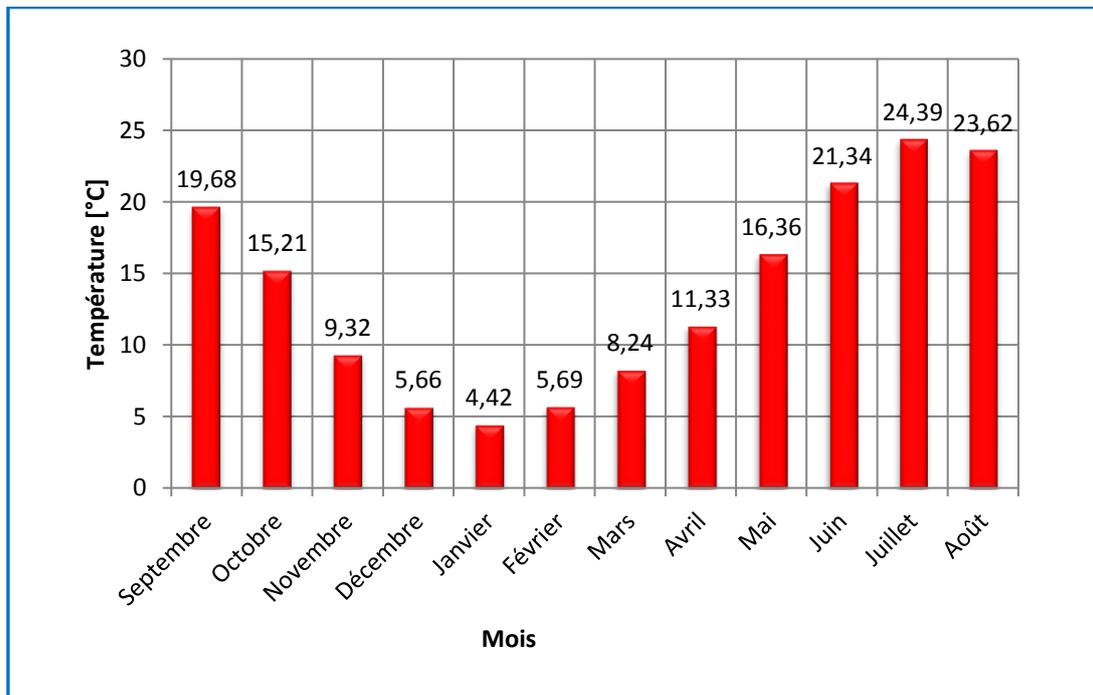


Figure (6.2) : Variation interannuelle de la température

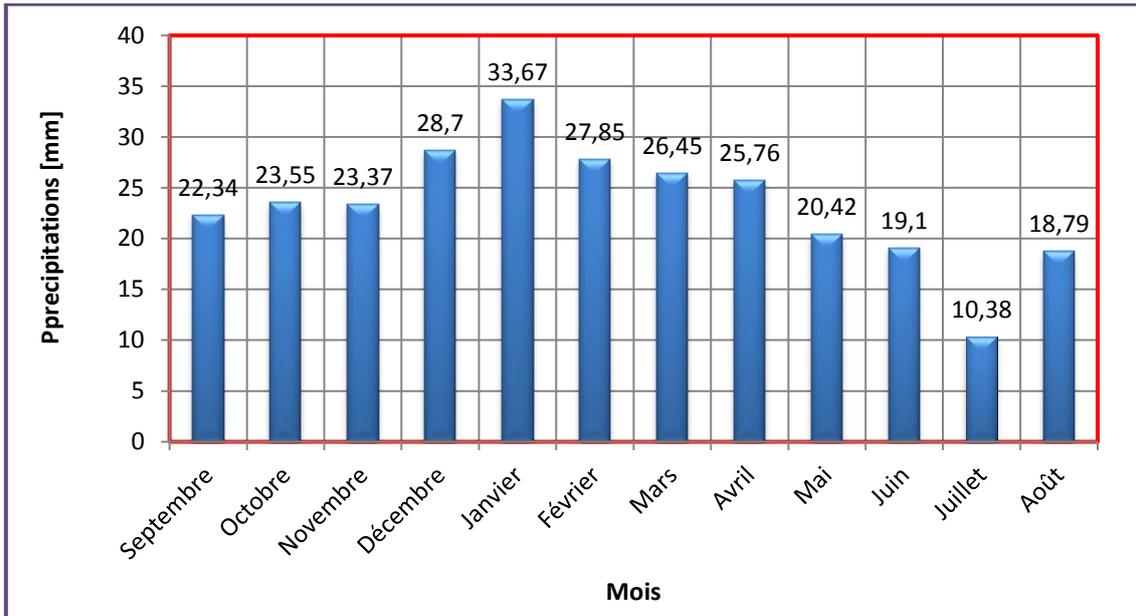


Figure (6.3) : Variation interannuelle des précipitations

### 6.2 Aperçue Hydrogéologique

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour la connaissance des éléments permettant la définition des caractéristiques d'une nappe. L'interprétation piézométrique nous permet la détermination du sens de l'écoulement des eaux et ainsi définir les relations existant entre les différents systèmes. La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité et perméabilité) renseigne sur les caractéristiques de la nappe.

#### 6.2.1 La carte piézométrique

Les cartes piézométriques (**Figure 6.4**) réalisées montrent un sens d'écoulement général dirigé de Sud-Est vers le Nord-Ouest conformément à la topographie. Un sens d'écoulement secondaire est confirmé dans la zone de Hammamet dirigé vers la plaine de Tébessa selon une direction Ouest-Est. Le gradient hydraulique est variable allant du **0,02** dans la partie Sud-Est (Bekkaria) à **0,008** dans la partie Nord-Ouest (Tebessa).

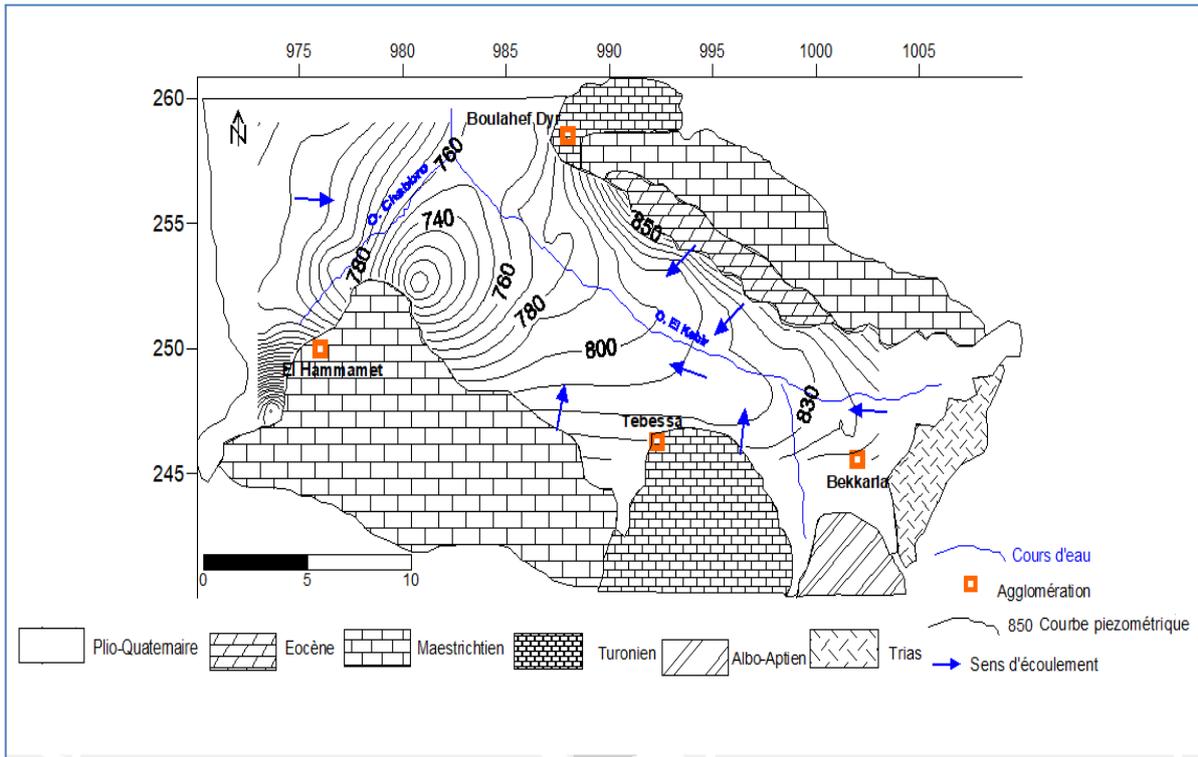


Figure (6.4) : la carte piézométrique de la nappe de Tébessa (juin 2017)

### 6.2.2 Carte de transmissivité :

Elle présente une morphologie variable due à l'hétérogénéité de la nappe aquifère. Cette variation révèle trois secteurs (Figure 6.5) : À l'ouest secteur de Hammamet; la transmissivité est importante elle atteint  $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , ceci est due à la présence de gros graviers (cailloutis de calcaire qui caractérise l'aquifère). Au secteur de Tébessa, la transmissivité connaît une diminution remarquable (Figure 6.5). Au centre de la plaine les valeurs sont faibles, de l'ordre de  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  résultant des formations argileuses et marneuses. Sur les bordures méridionales calcaires, les valeurs deviennent plus importantes atteignant  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

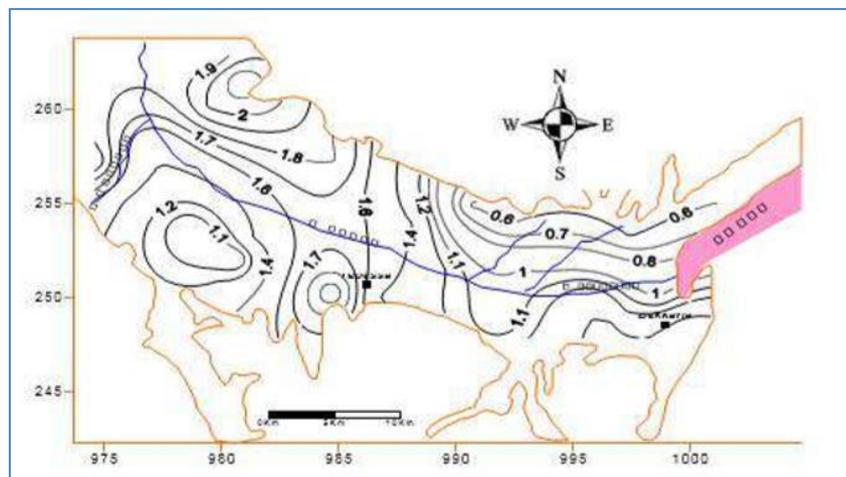
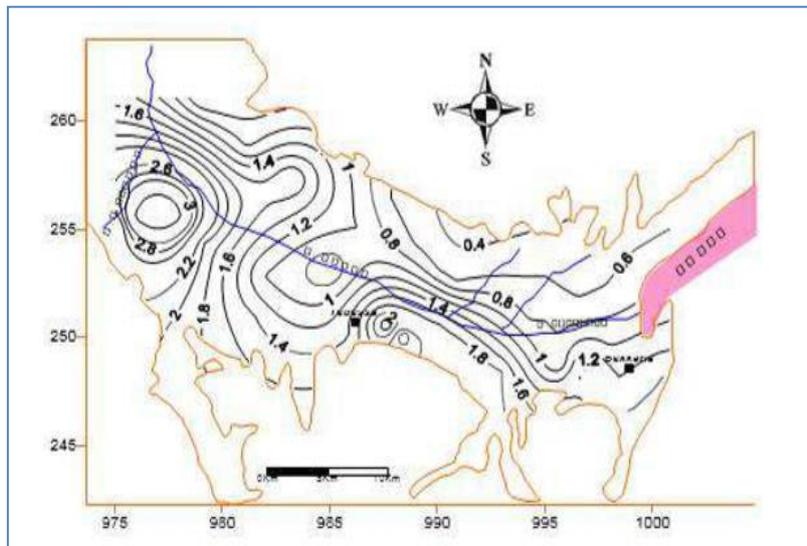


Figure (6.5) : la carte de transmissivité ( $\times 10^{-3}$ ) (Chikha-Debbar .2017)

### 6.2.3 Carte de perméabilité

- Secteur de Hammamet : Caractérisé par des valeurs élevées, pouvant atteindre  $4.10^{-5}$  m/s.
- Secteur de Tébesa : Les valeurs deviennent faibles au centre de la plaine à cause de la présence des formations imperméables (argile et marne), elles sont de l'ordre de  $6.10^{-6}$  m/s.
- La bordure méridionale est caractérisée par des valeurs élevées dues à l'influence des calcaires de bordure alimentant la nappe latéralement. Les valeurs peuvent atteindre  $3.10^{-5}$  m/s, cette variation est due à l'hétérogénéité de la géologie au niveau de ce secteur.
- Secteur de Bekkaria : Les valeurs sont relativement importantes dans cette zone, elles oscillent entre  $6.10^{-6}$  et  $1.4.10^{-5}$  m/s (**Figure 6.6**).



**Figure (6.6) : la carte de perméabilité ( $\times 10^{-5}$ ) (Chikha-Debbar .2017)**

### 6.2.4 Les données des forages de la région d'étude

A partir des fiches forages (**Coupes lithologiques**) illustrées par (**les figures 6.7 à 6.10**) les informations correspondant aux forages de la région sont obtenues (**Tableau 6.2**):

**Tableau (6.2) : les forages de la région de Bekkaria (source : l'hydraulique de Tébesa)**

N°	Nom	X(km)	y(km)	Perméabilité k (m/s)	Epaisseur e(m)	Transmissivité T [m <sup>2</sup> /s)	Gradient Hydraulique I	Débit Q (m <sup>3</sup> /s)	Porosité (%)
F1	FA2bis	1000850	247100	0,002	150	0,2580	0,02	0,012	0,34
F2	V4	1000420	248650	0,0006	90	0,0509	0,02	0,012	0,25
F3	X2	999400	245950	0,0006	100	0,0497	0,02	0,006	0,19
F4	FA5	1000100	247600	0,002	105	0,1704	0,02	0,02	0,3

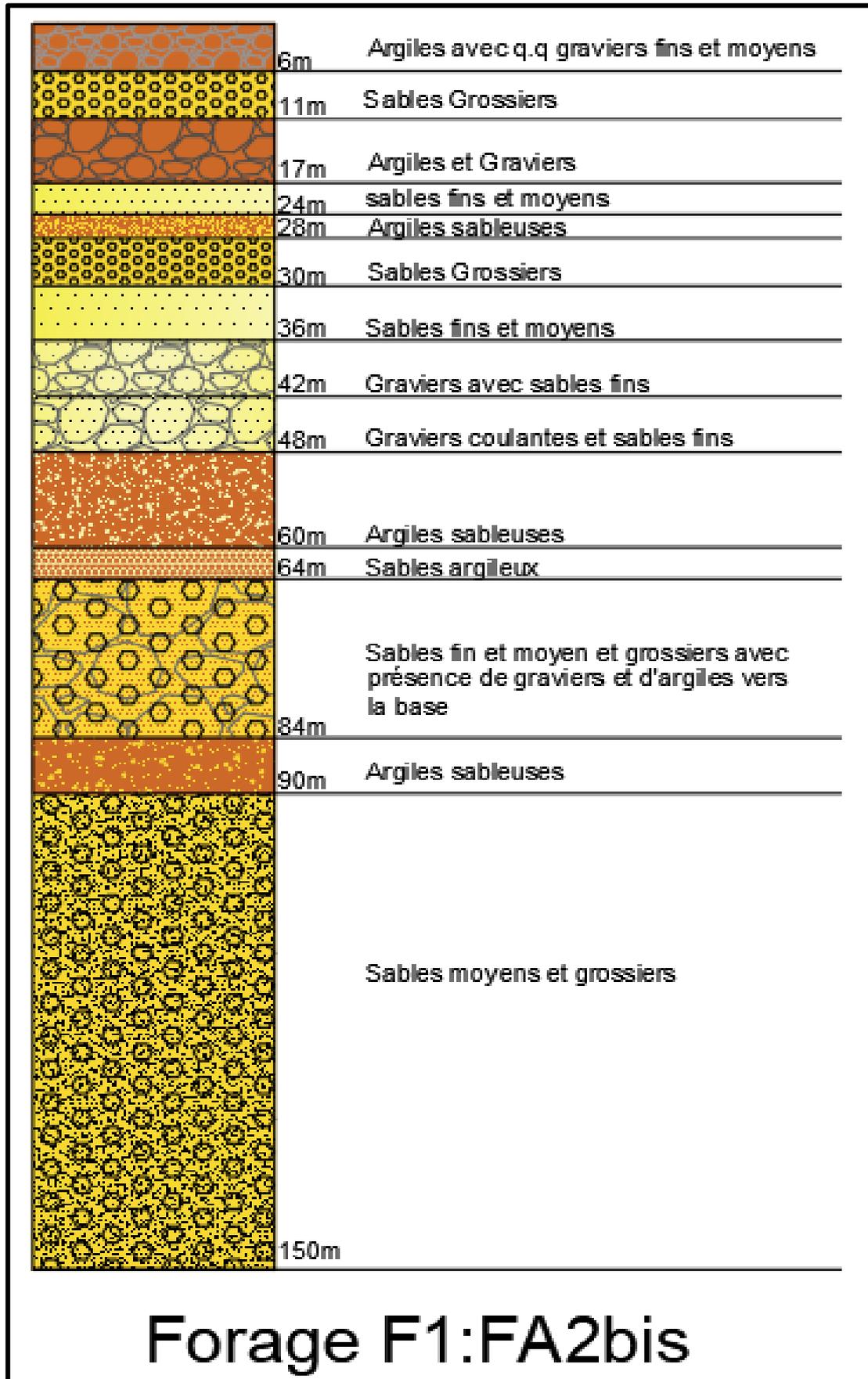


Figure (6.7) : Forage N°1 / FA2bis

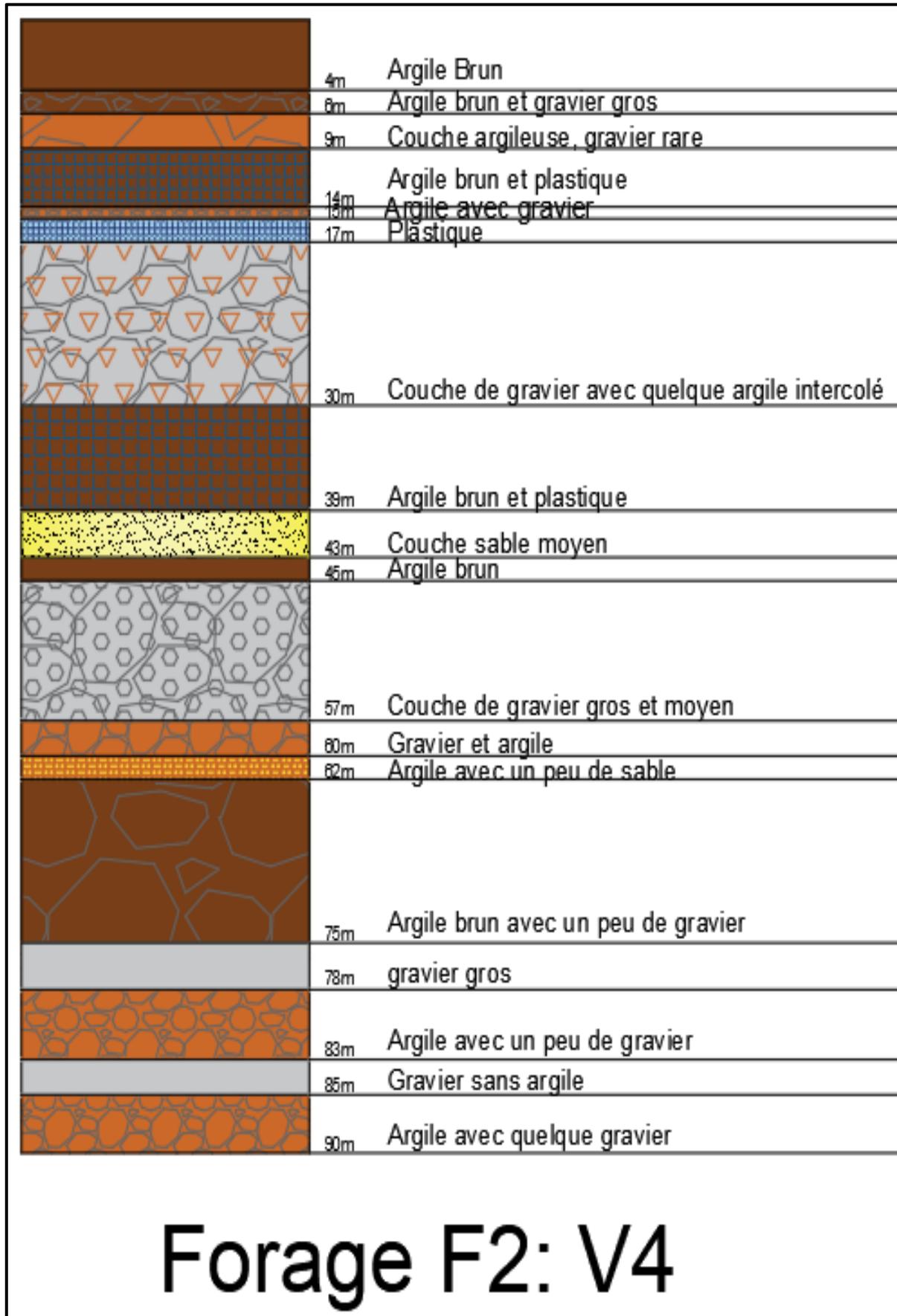


Figure (6.8) : Forage N°2 / V4

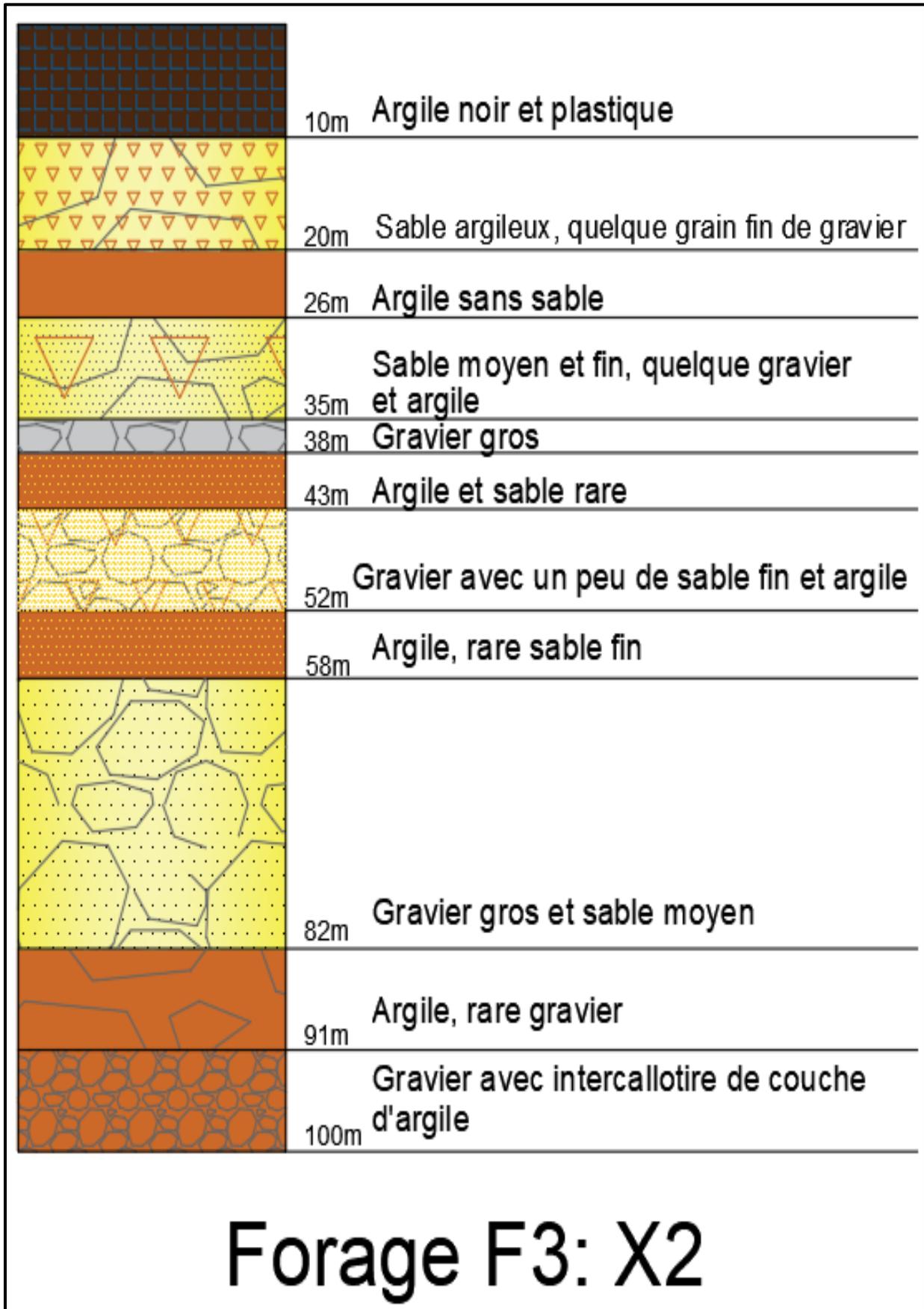


Figure (6.9) : Forage N°3 / X2

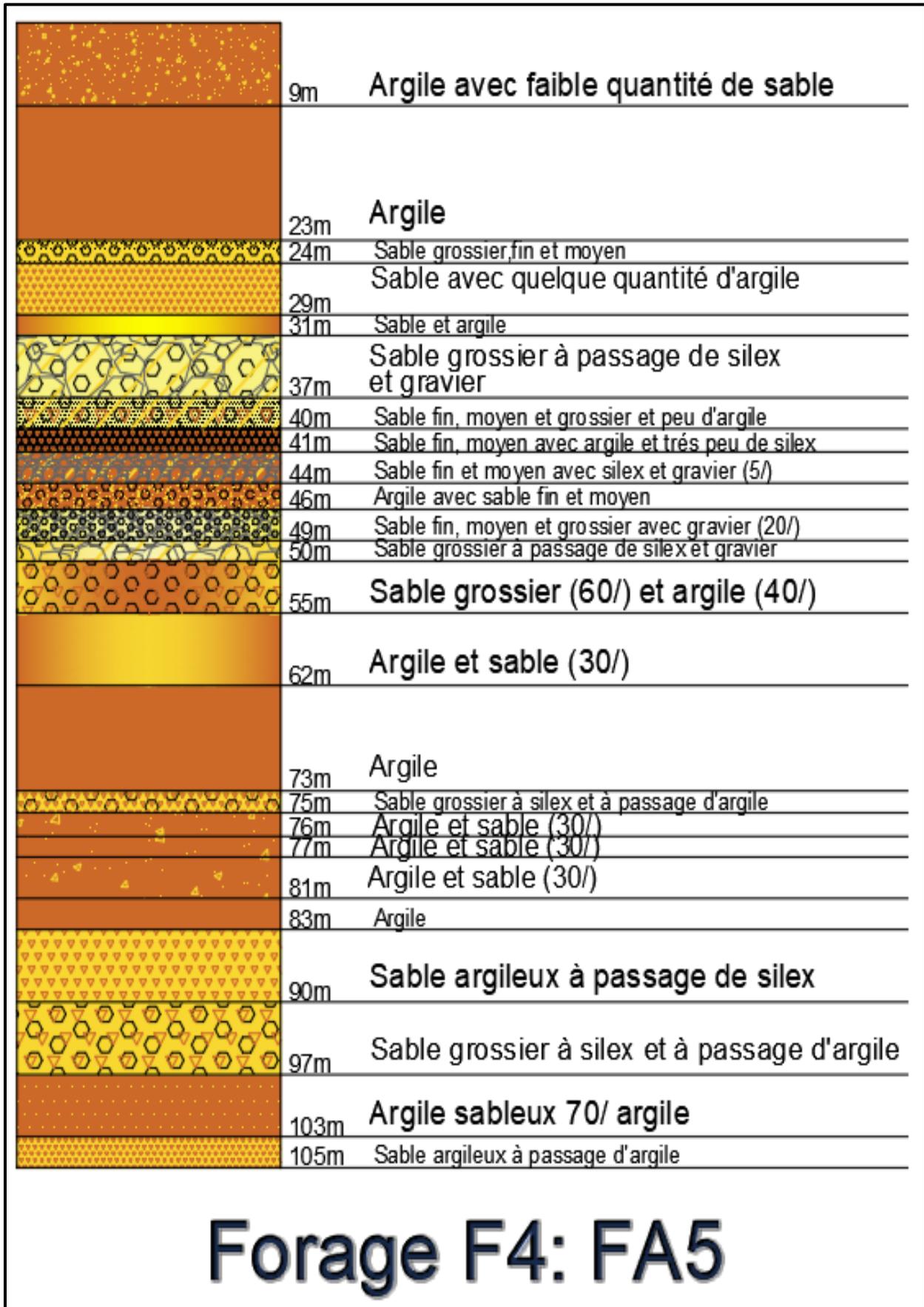


Figure (6.10) : Forage N°4 / FA5

**Chapitre VII :**  
**Détermination**  
**Des**  
**Périmètres de**  
**Protection**

### Chapitre 7 : Détermination des périmètres de protection

#### 7.1 Introduction

Comme il a été précité dans le chapitre (5), il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simple d'application à des méthodes très complexes. Le choix de la méthode et les valeurs seuil définissant les zones de protection dépendent aussi bien de critères administratifs (adéquation aux buts de protection, coûts, facilité de compréhension, capacité à être défendu, etc.), techniques (facilités d'application, quantité de données nécessaires, précision, etc.) et hydrogéologiques (distance, rabattement, temps de transit, limites des écoulements, etc.). Pour cette étude le choix des méthodes a été fait de façon à couvrir la gamme complète des méthodes disponibles.

Chaque Etat est responsable de la protection de ses eaux souterraines et a ses propres directives de protection. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. L'USEPA propose de définir trois zones de protection de façon à assurer une protection physique, microbille et chimique. Selon son analyse, la zone I devrait généralement être basée sur une distance d'au moins 30 m, et les zones II et III sur des temps de transit d'au moins 50 jours et 15 ans, respectivement.

Les périmètres de protection en fonction de la lithologie de l'aquifère Pour les milieux poreux il est recommandé :

- La zone de protection immédiate est de l'ordre de 10 à 20m.
- La zone de protection rapprochée est de l'ordre de 100m.
- La zone de protection éloignée présente 4 km en amont du captage

La démarche adoptée lors de la présente étude est axée sur l'application des méthodes analytiques dans la détermination des périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine, il s'agit, en l'occurrence, de l'application au champ de captage de Bekkaria (dite Ain El Khanga).

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la région Bekkaria a été réalisée à partir de quatre méthodes. Il s'agit de la méthode CFR, de la méthode d'infiltration, de la méthode de Wyssling et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Pour ce faire il a été nécessaire de faire des recherches bibliographiques et documentaires. Les recherches ont porté sur les documents scientifiques, les mémoires et les thèses en rapport avec notre thème.

Les sites choisis pour cette étude sont particuliers à cause de l'abondance de l'information disponible. Une grande partie de cette information est issue des cartes topographiques, des cartes géologiques, des rapports de forage, des bases de données météorologiques, des cartes pédologiques. L'autre partie de l'information a été obtenue auprès de La DHW ainsi que des travaux de mémoire de fin d'études réalisés dans la région.

Pour arriver à délimiter ces périmètres de protection, il a fallu passer par la collecte des paramètres hydrodynamiques des aquifères, des débits d'exploitation et la quantification de l'infiltration efficace (Recharge) par le traitement des données météorologiques. Les valeurs des rayons ont été ainsi comparées avec les valeurs de la littérature (Krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001) et nous avons retenu rien que les valeurs qui cadraient avec la littérature. Quatre ouvrages de captage situés dans la zone d'étude ont été sélectionnés (**Tableau 6.2**) ont. La sélection est basée sur la disponibilité des données.

### 7.2 Calcul de la recharge

#### 7.2.1 Définition de la recharge

De façon générale, la recharge correspond à la quantité d'eau qui arrive à la nappe et qui forme un ajout au réservoir d'eau souterraine (Vries and Simmers, 2002). Une partie des précipitations s'infiltrate et recharge l'aquifère. Une part des précipitations peut également ruisseler (en surface ou subsurface) et/ou s'évapotranspirer (**Figure 7.1**).

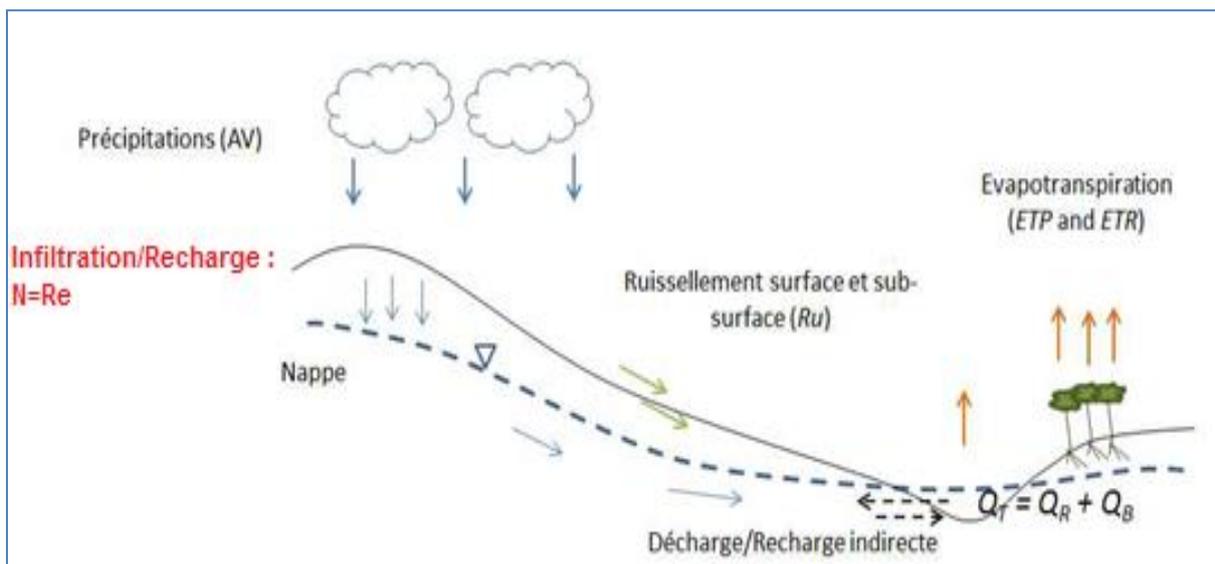


Figure (7.1) : Bilan hydrologique d'un bassin versant

On distingue la recharge directe, qui provient des précipitations et de l'irrigation et qui se produit sur de grandes étendues spatiales, de la recharge indirecte plus locale qui se fait à partir de la surface topographique par des rivières ou des lacs ou encore à partir du ruissellement de surface (infiltration des eaux de ruissellement venant du bassin plus en amont). On différencie également la recharge potentielle de la recharge réelle ou nette. La première représente la quantité totale d'eau qui s'est infiltrée et qui ne rejoint pas nécessairement la nappe.

La recharge réelle représente plutôt la quantité d'eau qui atteint la nappe après avoir soustrait des précipitations les phénomènes de ruissellement hypodermique, d'*ETR* (évapotranspiration réelle) et autres processus induisant une perte d'eau. Différents paramètres influencent directement la recharge, à savoir, le climat, la topographie, le sol, la végétation et la géologie. La recharge varie aussi spatialement selon l'épaisseur de la zone vadose (Flint *et al.*, 2002). En région humide, la recharge est principalement limitée par la capacité de l'aquifère à stocker ou à transporter l'eau, alors qu'en région plus aride la recharge dépend surtout des événements pluviométriques de haute intensité, seuls moments où les précipitations excèdent l'*ETR* (Scanlon *et al.*, 2002).

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

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

Les zones de recharge préférentielles sont vulnérables vis-à-vis des contaminants qui peuvent de ce fait migrer rapidement à travers la zone non saturée. A partir des études d'évaluation des zones de recharge préférentielles, des périmètres de protection des captages d'eau potable peuvent être définis. Au contraire, localiser les zones de faible recharge permet d'évaluer les capacités d'un site de stockage potentiel pour le confinement de déchets (Flint *et al.*, 2002). Ceci requiert des informations plus détaillées sur la variation spatiale de la recharge et les écoulements préférentiels.

### 7.2.2 Les différentes méthodes d'estimation de la recharge

Pour la détermination quantitative de la recharge des nappes, plusieurs méthodes ont été proposées et testées. Des approches hydrodynamiques, hydrologiques et des modèles mathématiques ont été adoptés. Il est cependant difficile de choisir parmi ces nombreuses méthodes la plus appropriée pour un système aquifère donné. Les paramètres climatiques, géologiques et géomorphologiques contrôlent largement la recharge à tout point de vue et jouent donc un grand rôle concernant le choix de la technique à adopter (Gogolev 2002 ; Scanlon *et al.*, 2002). La sélection se fait aussi selon l'échelle spatio-temporelle, la gamme de valeurs de la recharge et le mécanisme recherché (Flint *et al.*, 2002 ; Yin *et al.*, 2011). Il ne faut pas non plus négliger le niveau de complexité de réalisation des différentes méthodes, leur coût, leur durée d'investigation, leur efficacité selon la zone d'étude ou encore la disponibilité des données en termes de qualité et de quantité (Yin *et al.*, 2011).

L'approche de bilan hydrique est utilisée dans le cadre de travail. Cette approche basée sur la loi de conservation de la masse dans le cycle hydrologique. La différence entre les entrées et les sorties d'eau dans le système équivaut à la variation de stockage d'eau dans les réservoirs. La recharge est ainsi obtenue par différence, en calculant tous les autres termes. La manière la plus courante de réaliser un bilan hydrologique est l'utilisation de modèles hydrologiques comme *HYDROTEL*, *SWAT*, *HELP*, *CEQUEAU* ou *MOHYSE* (Croteau *et al.*, 2010).

#### 7.2.2.1 Le bilan hydrique

On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

- Les précipitations,
- Le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,
- L'évaporation.

Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps.

En principe, cette période d'une année est choisie en fonction des conditions climatiques. Ainsi en fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débuter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire.

## Chapitre VII : détermination des périmètres de protection

---

Au niveau de l'espace, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant mais il est possible de raisonner à un autre niveau (zone administrative, entité régionale, etc.). L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P + S = R + E + (S \mp \Delta S) \quad (7.1)$$

Avec :

P : précipitations (liquide et solide) [mm],

S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],

E : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm],

S + DS : ressources accumulées à la fin de la période [mm].

On exprime généralement les termes du bilan hydrique en hauteur d'eau (mm par exemple), on parle alors de lame d'eau (précipitée, écoulée, évaporée, stockée, etc.). Cette équation exprime simplement que la différence entre le débit d'eau entrant et le débit d'eau sortant d'un volume donné (par exemple un bassin versant) au cours d'une période déterminée est égale à la variation du volume d'eau emmagasinée au cours de la dite période.

Elle peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E = I - O \mp \Delta S \quad (7.2)$$

Avec :

E : évaporation [mm] ou [m<sup>3</sup>],

I : volume entrant [mm] ou [m<sup>3</sup>],

O : volume sortant [mm] ou [m<sup>3</sup>],

DS : variation de stockage [mm] ou [m<sup>3</sup>].

Si le bassin versant naturel est relativement imperméable, la variation de stock sur une période donnée peut être considérée comme nulle (DS=0). Dès lors, on peut introduire le déficit d'écoulement D dans l'équation qui s'écrit :

$$I - O = D \quad (7.3)$$

Ce déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide de mesures ou de méthodes de calcul. A titre illustratif, les formules de Turc et Coutagne sont les suivantes :

➔ **Formule de Turc :**

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (7.4)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle [°C].

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Cette formule peut être utilisée lorsque les valeurs décadaires ou mensuelles de la température et des précipitations ne sont pas disponibles.

➔ **Formule de Coutagne :**

$$D = P - mP^2 \quad (7.5)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle [mm],

$m = 1/(0.8 + 0.14 T)$  : coefficient régional.

L'expression (1) n'est applicable que si :  $(\frac{1}{8m} \leq P \leq \frac{1}{2m})$

Si les précipitations sont inférieures à  $(\frac{1}{8m})$  le déficit d'écoulement sera égal aux précipitations ( $D = P$ ), donc il n'y a pas d'écoulement. Si les précipitations sont supérieures à  $(\frac{1}{2m})$  le déficit d'écoulement sera indépendant de P et déduit à partir de l'expression :

$$D = \frac{0,8 + 0,14T}{4} = \frac{1}{4m} \quad (7.6)$$

### 7.2.2.2 L'évaporation/l'évapotranspiration

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire. L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. En général,

des analyses spécifiques d'évaporation devront être faites pour des études de bilan et de gestion de l'eau par les plantes. Cependant, ces analyses approfondies sont moins nécessaires pour les études de projets d'aménagement où l'eau est plutôt considérée sous un aspect d'agent dynamique.

Comme pour la mesure des précipitations, l'unité est le millimètre de hauteur d'eau. 1 mm correspond à 1 litre par mètre carré ou à 10 mètres cubes par hectare. L'évapotranspiration réelle peut atteindre 4 à 6 mm/jour en plein été en zone tempérée européenne et 6 à 8 mm/jour en zone méditerranéenne. Le terme L'évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. On distingue :

- **L'évapotranspiration réelle (ETR)** : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.
- **L'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>)** : (anciennement évapotranspiration potentielle) : quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

Plusieurs concepts supplémentaires ont été ajoutés pour préciser les estimations de l'évapotranspiration. Ces concepts ont des définitions variables selon les auteurs. Pour la végétation des déserts chauds, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est très importante en raison de la chaleur et l'ensoleillement. Mais l'évapotranspiration réelle (ETR) est très faible, car le manque d'eau disponible pour le sol et les plantes (sécheresse) est un facteur limitant.

La notion d'**évapotranspiration potentielle** (ETP) est couramment opposée à l'**évapotranspiration réelle** (ET ou ETR, anglais : *actual evapotranspiration ETa*). L'évapotranspiration réelle désigne la quantité exacte d'eau évapotranspirée par une couverture végétale réelle. C'est une donnée impossible à mesurer à l'échelle d'une parcelle ou d'une région. À l'opposé, l'évapotranspiration potentielle est une valeur calculée par des formules mathématiques. L'ETP est ainsi l'objet de définitions variées, selon les auteurs et les méthodes de calcul employées. Cette notion de consommation potentielle en eau a été introduite par Thornthwaite en 1948, puis reprise par Howard Penman dans sa formule de calcul (1948).

En 1956, Penman (1956) définit l'ETP comme : « l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau ».

Selon les auteurs et les méthodes, différents paramètres météorologiques, physiques ou biologiques sont inclus ou non dans la définition de l'ETP : par exemple l'espèce végétale, la constance des flux d'énergies, l'ouverture des stomates, la constance de l'humidité relative...

Ces deux notions ETR et ETP sont utiles et nécessaires pour étudier les bilans de circulation de l'eau et notamment pour déterminer les besoins en eau des cultures. Les plantes de milieux arides peuvent fortement réduire leur évapotranspiration quand elles manquent d'eau.

Les plantes des zones tropico-équatoriales pluvieuses ne le peuvent généralement pas.

Une autre méthode est celle de **Thornthwaite**. L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle en tenant compte seulement de la température mensuelle.

La formule de Thornthwaite, établie aux Etats-Unis, permet de calculer l'évapotranspiration de référence mensuelle (en cm) pour une durée théorique d'éclairement de 12 heures par 24 heures. Elle s'exprime comme suit :

$$ETP = 1,6 * \left(\frac{10}{I}\right)^a * t^a * f \quad (7.7)$$

*ETP*: évapotranspiration potentielle mensuelle [cm],

*t* : température moyenne mensuelle [°C],

*I* : indice thermique annuel, défini comme la somme des indices thermiques mensuels *i* avec

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (7.8)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

La valeur de *a* est donnée par l'expression de L. SERRA de 1954 par simplification de la formule de THORNTHWAITE

$$a = 0,016I + 0,5 \quad (7.9)$$

*f*: facteur de correction  $f = N \cdot \rho$

*N*: durée astronomique du jour pendant le mois considéré [h/j];

- ▶  $\rho$ : paramètre dépendant du nombre de jours par mois
- ▶  $\rho = 0.0778$  pour un mois de 28 jours
- ▶  $\rho = 0.0806$  pour un mois de 29 jours

## Chapitre VII : détermination des périmètres de protection

- ▶  $\rho = 0.0833$  pour un mois de 30 jours
- ▶  $\rho = 0.0861$  pour un mois de 31 jours

Les estimations de l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle **sont** présentées par les tableaux (7.1 et 7.2)

**Tableau (7 .1) : Estimation de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwaite**

mois	température	N	i	I	a	f	ET0
	[°C]		[°C]	[°C]			[mm/mois]
<b>Janvier</b>	4,42	9,1	1,34	50,04	1,30	0,78	10,67
<b>Février</b>	5,69	10,4	1,72	50,04	1,30	0,81	15,30
<b>Mars</b>	8,24	11,9	2,50	50,04	1,30	1,02	31,36
<b>Avril</b>	11,33	13,5	3,43	50,04	1,30	1,12	52,08
<b>Mai</b>	16,36	14,9	4,95	50,04	1,30	1,28	95,82
<b>Juin</b>	21,34	15,7	6,46	50,04	1,30	1,31	138,01
<b>Juillet</b>	24,39	15,4	7,39	50,04	1,30	1,33	166,47
<b>Août</b>	23,62	14,2	7,15	50,04	1,30	1,22	147,23
<b>Septembre</b>	19,68	12,6	5,96	50,04	1,30	1,05	99,69
<b>Octobre</b>	15,21	10,9	4,61	50,04	1,30	0,94	63,75
<b>Novembre</b>	9,32	9,5	2,82	50,04	1,30	0,79	28,43
<b>Décembre</b>	5,66	8,7	1,34	50,04	1,30	0,78	10,67
							<b>Total=862,88</b>
							<b>[mm]</b>

Tableau (7 .2) : Estimation de l'évapotranspiration réelle par la méthode de Turc

Mois	T	P	L	ETR
Septembre	19,68	22,34	1173,11	23,54
Octobre	15,21	23,55	856,19	20,46
Novembre	9,32	23,37	573,48	24,61
Décembre	5,66	28,70	450,57	23,86
Janvier	4,42	33,67	414,82	25,26
Février	5,69	27,85	451,46	21,05
Mars	8,24	26,45	533,97	27,84
Avril	11,33	25,76	655,97	23,91
Mai	16,36	20,42	927,94	21,52
Juin	21,34	19,10	1319,41	20,13
Juillet	24,39	10,38	1635,20	10,94
Août	23,62	18,79	1549,39	19,80
Somme		280,38		<b>262,94 mm</b>

### 7.2.2.3 Estimation du ruissellement

Le ruissellement correspondant à la part des précipitations qui s'écoule directement sur le sol lors des précipitations. Il peut donc être connu d'une façon générale par analyse de l'hydrogramme d'un cours d'eau ou à l'aide des méthodes empiriques qui donnent une valeur approchée. Parmi les méthodes empiriques on peut citer celle de Tixeront et Berkaloff. Ces auteurs ont établi une formule qui permet d'étudier le ruissellement moyen annuel.

Pour des précipitations ne dépassent pas les 600 mm elle est donnée par l'expression suivante :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad (7.10)$$

Avec :

- ▶ **R** : ruissellement en (mm)
- ▶ **P** : précipitations moyennes annuelles
- ▶ **ETP** : évapotranspiration potentielle en (mm) (calculée par la méthode de Thornthwaite)

La formule de Tixeront-Berkaloff modifiée par Romantchouken pour  $P > 600$  mm,

$$R = \frac{P^3}{3}$$

Les précipitations enregistrées dans la région d'étude sont inférieures à 600 mm, la formule utilisée est celle de **Tixeront Berkallof**.

La formule empirique de *Tixeront-Berkaloff*, ci-après, qui s'appliquerait le plus souvent aux bassins hydrologiques en climat semi-aride à aride, s'appuyant sur la théorie suivante :

- ➡ Si les précipitations sont vues à la hausse, le ruissellement lui, tend à une grandeur qui leur soit analogue (déduction faite de l'*ETR* plafonnée à la valeur de l'*ETP*).
- ➡ Si les précipitations tendent à s'anéantir, le ruissellement se réduit à néant et le rapport ruissellement/pluviométrie tend par conséquent vers zéro.

280,38

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} = \frac{280,38^3}{3 * 862,88^2} = 9,87 \text{ mm}$$

### 7.2.2.4 Estimation Infiltration (N)

L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines. On est appelé d'avoir recours à l'équation générale du bilan qui permettrait d'avoir d'admissibles approches du paramètre, puisque tous les composants de l'équation sont connus.

$$P = ETR + R + N \text{ et par conséquent } N = P - (ETR - R) \quad (7.11)$$

Avec :

*N*: Infiltration efficace moyenne annuelle (mm),

*P*: Précipitation moyenne annuelle (mm).

*ETR*: Évapotranspiration réelle annuelle (mm),

*R*: Ruissellement annuel (mm).

$$N = 280,38 - (262,94 + 9,87) = 7,57 \text{ mm}$$

## 7.3 Application des approches sélectionnées

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la région Bekkaria a été réalisée à partir de quatre méthodes. Il s'agit de la méthode CFR, de

## Chapitre VII : détermination des périmètres de protection

la méthode d'infiltration, de la méthode de Wyssling et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (7.3 à 7.6)

**Tableau (7.3) : Application de la méthode CFR**

Tableau (7.3) : Application de la méthode CFR								
N°	Nom	Q (m <sup>3</sup> /j)	Pi	n	b (m)	t (j)	(Q*t)/(Pi*n*b)	r (m)
F1	FA2bis	1036,8	3,14	0,34	150	1	6,47	2,54
F2	V4	1036,8	3,14	0,25	90	1	14,67	3,83
F3	X2	518,4	3,14	0,19	100	1	8,68	2,95
F4	FA5	1728	3,14	0,30	105	1	17,46	4,18
N°	Nom	Q (m <sup>3</sup> /j)	Pi	n	e (m)	t (j)	(Q*t)/(Pi*n*b)	r (m)
F1	FA2bis	1036,8	3,14	0,34	150	50	323,55	17,99
F2	V4	1036,8	3,14	0,25	90	50	733,39	27,08
F3	X2	518,4	3,14	0,19	100	50	434,24	20,84
F4	FA5	1728	3,14	0,3	105	50	873,08	29,55
N°	Nom	Q (m <sup>3</sup> /j)	Pi	n	e (m)	t (j)	(Q*t)/(Pi*n*b)	r (m)
F1	FA2bis	1036,8	3,14	0,34	150	365	2361,93	48,60
F2	V4	1036,8	3,14	0,25	90	365	5353,72	73,17
F3	X2	518,4	3,14	0,19	100	365	3169,96	56,30
F4	FA5	1728	3,14	0,3	105	365	6373,47	79,83

**Tableau (7.4) : Application de la méthode Wyssling**

N°	Nom	B (m)	X0 (m)	V (m/j)	L (m)	S0 (m)	SU (m)
F1	FA2bis	200,93	31,98	0,10	0,10	2,79	2,69
F2	V4	1152	183,35	0,04	0,04	3,97	3,93
F3	X2	518,40	82,51	0,05	0,05	3,27	3,21
F4	FA5	476,19	75,79	0,12	0,12	4,70	4,58
N°	Nom	B (m)	X0 (m)	V (m/j)	L (m)	S0 (m)	SU (m)
F1	FA2bis	200,93	31,98	0,10	5,06	22,09	17,03
F2	V4	1152	183,35	0,04	2,00	28,93	26,93
F3	X2	518,40	82,51	0,05	2,63	24,26	21,63
F4	FA5	476,19	75,79	0,12	5,76	35,81	30,05
N°	Nom	B (m)	X0 (m)	V (m/j)	L (m)	S0 (m)	SU (m)
F1	FA2bis	200,93	31,98	0,10	36,93	74,03	37,10
F2	V4	1152	183,35	0,04	14,60	83,05	68,45
F3	X2	518,40	82,51	0,05	19,21	72,24	53,03
F4	FA5	476,19	75,79	0,12	42,05	112,12	70,07

**Tableau (7.5) : Application de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira**

N°	Nom	F	X	rmax (m)	rmin (m)	rp
F1	FA2bis	0,03	0,56	21,82	15,20	18,04
F2	V4	0,01	0,15	28,57	26,71	27,15
F3	X2	0,01	0,25	22,81	19,78	20,89
F4	FA5	0,01	0,39	33,88	26,66	29,63
N°	Nom	F	X	rmax (m)	rmin (m)	rp
F1	FA2bis	0,03	1,52	77,60	27,93	18,04
F2	V4	0,01	0,40	84,15	65,78	27,15
F3	X2	0,01	0,68	70,91	45,44	20,89
F4	FA5	0,01	1,05	112,27	55,63	29,63
N°	Nom	F	X	rmax (m)	rmin (m)	rp
F1	FA2bis	0,03	0,08	2,62	2,57	18,04
F2	V4	0,01	0,02	3,86	3,95	27,15
F3	X2	0,01	0,04	2,99	3,03	20,89
F4	FA5	0,01	0,06	4,26	4,26	29,63

**Tableau (7.6) : Application de la méthode d'infiltration**

N°	Nom	Q (m <sup>3</sup> /j)	N (m/j)	Pi	r (m)
F1	FA2bis	1036,8	0,02	3,14	128,46
F2	V4	1036,8	0,02	3,14	128,46
F3	X2	518,4	0,02	3,14	90,83
F4	FA5	1728	0,02	3,14	165,84

Pour une meilleure lecture et appréhension des résultats de calculées, ces dernières sont regroupées dans le tableau (7.7)

**Tableau (7.7) : Récapitulatif des résultats**

<b>Zone de protection immédiate (t=1 jour)</b>						
<b>Forage</b>	<b>CFR</b>	<b>Wyssling</b>		<b>Krijnsman and lobo Ferreira</b>		
	<b>r</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	
FA2bis	2,54	2,79	2,69	2,62	2,57	
V4	3,83	3,97	3,93	3,86	3,95	
X2	2,95	3,27	3,21	2,99	3,03	
FA5	4,18	4,70	4,58	4,26	4,26	
<b>Zone de protection intermédiaire (50 jours)</b>						
<b>Forage</b>	<b>CFR</b>	<b>Wyssling</b>		<b>Krijnsman and lobo Ferreira</b>		
	<b>r</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	
FA2bis	17,99	22,09	17,03	21,82	15,20	
V4	27,08	28,93	26,93	28,57	26,71	
X2	20,84	24,26	21,63	22,81	19,78	
FA5	29,55	35,81	30,05	33,88	26,66	
<b>Zone de protection éloignée (365 jours)</b>						
<b>Forage</b>	<b>CFR</b>	<b>Wyssling</b>		<b>Krijnsman and lobo Ferreira</b>		<b>Infiltration</b>
	<b>r</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>r</b>
FA2bis	48,60	74,03	37,10	77,60	27,93	128,46
V4	73,17	83,05	68,45	84,15	65,78	128,46
X2	56,30	72,24	53,03	70,91	45,44	90,83
FA5	79,83	112,12	70,07	112,27	55,63	165,84

A partir du tableau (7.7), il ressort que les méthodes donnent approximativement des résultats similaires.

Certaines légères différences sont en particulier observables dans le calcul relatif à la zone de protection éloignée.

Partant du fait que les valeurs minimales utilisées mondialement pour les trois zones de protection sont :

## Chapitre VII : détermination des périmètres de protection

---

- La zone de protection immédiate est de l'ordre de 10 à 20m.
- La zone de protection rapprochée est de l'ordre de 100m.
- La zone de protection éloignée présente 4 km en amont du captage

On remarque que les valeurs calculées par les quatre méthodes sont inférieures aux valeurs précitées, par conséquent on peut conclure qu'il s'agit d'une sous-protection. Pour les ouvrages de captage Bekkaria, il est souhaitable d'utiliser un rayon plus important pour garantir une protection plus accrue de l'environnement immédiat ; compte tenu de l'intensification des activités anthropiques et des installations à proximité de ceux-ci.

**Conclusion**

**Et**

**Perspective**

### Conclusion et Perspectives

L'eau dans son environnement naturel doit être protégée par des périmètres de protection limitant certaines activités dans les voisinages des points de prélèvement. Il faut établir des directives prenant les mesures nécessaires pour prévenir, limiter ou assainir la contamination de tous les « corps d'eaux souterraines ». Les objectifs sont d'assurer une « bonne qualité » des eaux dans le futur ainsi qu'une réduction et un contrôle des pollutions agricoles, industrielles et urbaines.

Une protection globale des eaux souterraines permet de protéger les eaux captées. Il est, par conséquent, recommandé d'établir des zones de protection pour l'ensemble des « corps d'eaux souterraines ».

Dans le cadre de ce mémoire, la détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines de la zone d'étude a été réalisée à partir de quatre méthodes. Il s'agit de la méthode CFR, de la méthode d'infiltration, de la méthode de Wyssling et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Parmi Les méthodes mathématiques utilisées nous avons les méthodes de calcul de rayon fixe qui sont faciles à appliquer du fait de la simplicité à déterminer les paramètres qui y interviennent. Mais elles peuvent être imprécises, puisque les équations n'exigent pas beaucoup de facteurs qui influencent l'écoulement d'eaux souterraines. Partant de ce problème nous avons utilisé les méthodes de calcul de rayon fixe pour déterminer le rayon du périmètre de protection immédiate.

La méthode CFR utilisée tient compte de la géologie locale, des caractéristiques hydrauliques régionales et des débits de pompage des ouvrages de captage.

La méthode CFR considère deux paramètres fondamentaux : la distance et le temps de transfert. Elle est dite méthode du calcul du rayon fixe parce que le secteur qu'il décrit est un cercle qui a un rayon égal dans toutes les directions.

La méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira permet de déterminer les valeurs du temps de transfert sur une surface donnée à partir des solutions de l'équation analytique.

L'approche utilisant l'écoulement uniforme a été exclue préalablement. En effet cette approche simplifiée à l'extrême les conditions d'écoulement et est très sensible aux variations des propriétés hydrogéologiques.

La méthode CFR et celle d'infiltration ne prennent pas en compte l'écoulement souterrain régional à l'origine d'un gradient hydraulique.

## Conclusion et Perspective

---

Uniquement la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira et la méthode de Wyssling tiennent compte du gradient hydraulique et de beaucoup d'autres paramètres hydrodynamiques de l'aquifère capté.

Partant du fait que les valeurs minimales utilisées mondialement pour les trois zones de protection sont :

- La zone de protection immédiate est de l'ordre de 10 à 20m.
- La zone de protection rapprochée est de l'ordre de 100m.
- La zone de protection éloignée présente 4 km en amont du captage

On a remarqué que les valeurs calculées par les quatre méthodes sont inférieures à ces dernières, par conséquent on peut conclure qu'il s'agit d'une sous-protection.

Pour les ouvrages de captage Bekkaria, il est souhaitable d'utiliser un rayon plus important pour garantir une protection plus accrue de l'environnement immédiat ; compte tenu de l'intensification des activités anthropiques et des installations à proximité de ceux-ci.

- Les méthodes analytiques sont conviviales et faciles à appliquer, et certaines d'entre elles, comme la méthode Wyssling et de Krijgsman -Lobo-Ferreira, peuvent donner des solutions solides et aussi plus de précision dans la délimitation de WHPA.
- Les modèles numériques peuvent également donner des solutions robustes dans le cas de systèmes hydrogéologiques complexes mais leur utilisation implique la disponibilité d'une grande quantité d'informations complexes et aussi plus d'expertise, ce qui rend leur application plus coûteuse.

D'autres études comparatives portant sur les méthodes de détermination des PDP devraient être envisagées.

Ces études permettraient d'élargir nos connaissances et de développer une méthodologie face à l'établissement des PDP pour différents contextes hydrogéologiques.

Une fois cette connaissance technique acquise, l'établissement d'une méthodologie de gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des PDP qui intégrerait à la fois les aspects scientifiques, sociaux, économiques et législatifs devrait être mises à disposition.

En Algérie, beaucoup d'efforts restent à faire afin d'empêcher la détérioration de la qualité de l'eau souterraine.

En conséquence, il serait bénéfique d'envisager d'autres études en appliquant plusieurs autres méthodes, qu'elles soient analytiques ou numériques et qui prennent aussi en compte les

## Conclusion et Perspective

---

conditions sociales, économiques et législatives afin de proposer une méthodologie qui sera applicable par les autorités en charge de l'eau et de la protection de l'environnement Algérie.

Concernant la législation, les textes nécessitent un complément important pour répondre aux normes de protection environnementale. L'application de la réglementation sur le terrain nécessite une bonne volonté et une responsabilisation des acteurs concernés.

Le problème de disponibilité de données se pose aussi pour la délimitation des périmètres de protection. Par ailleurs, nous recommandons que :

- La méthode CFR soit utilisée pour déterminer les PDP au cas où très peu d'information ou de données sont disponibles,
- La méthode de Krijgsman-Lobo Ferreira soit utilisées au cas où des essais de pompage sont réalisés et que l'on dispose de quelques données sur l'aquifère captée (gradient hydraulique, porosité).
- Les quatre méthodes peuvent être utilisés en Algérie parce qu'elles nécessitent peu de moyens financiers et peu d'expertise technique mais avec la méthode d'infiltration les PDP occupent beaucoup plus d'espace et semble ne pas présenter des avantages économiques.
- Nous recommandons qu'une campagne piézométrique soit menée afin de disposer d'une carte piézométrique couvrant les forages du champ. Ceci permettra de déterminer les directions d'écoulement au niveau de chaque forage et par suite de construire les PDP.
- Une étude préalable des zones de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine soit réalisée avant la construction de toutes zones urbaines.
- Réduire les débits de pompage car ils ont une influence importante sur les rayons des périmètres.

# Références

## Bibliographiques

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques :

**Aller, L., BENNETT, T., LEHR, J., PETTY, R., HACKETT, G. (1987):**

– *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings.*

National Water Well Association, Dublin Ohio/EPA Ada, Oklahoma, USA.

EPA-600/2-87-035.

**ANRH** (Agence nationale des ressources hydrauliques) (2007) : Champ de captage In Salah, Direction régionale Sud-Ouest Adrar, Rapport technique 63p.

**AYAD, W. (2017) :** Evaluation de la qualité physico-chimique et Bactériologique des eaux souterraines : cas des Puits de la région.

These. ING. Microbiology Appliqué. Univ. BADJI MOKHTAR –ANNABA. p09.

**Bair, E. S. et G. S. Roadcap. (1992).** Comparison of Flow used to Delineate capture Zones of Wells: 1. Leaky-Confined Fractured-Carbonate Aquifer Groundwater, Vol .30, n o.2, p. 199-21.

**Bates, J. K. et J. F. Evans. (1996).**

Evaluation of Wellhead protection Area Delineation Methods, Applied to the Municipal Well Field at Elmore, Ottawa Country, Ohio. Ohio Journal of Science V, ol.9 6, no. 1, p.13-22.

**Beach, G (2001):** Methods for the delineation of wellhead protection areas (WHPAs), Wellhead protection (WHP) Program Guidance Document–Appendix D.

Wyoming Department of Environmental quality.

Water Quality Division–Groundwater protection section Herschler Bldg., 4th floor west, Cheyenne, wy 82002.

**Bear, J., et M. JACOBS. (1965):** “*On the movement of water bodies injected into aquifers*”, Journal of Hydrology, vol. 3, pages 37-57.

**Bonnet M., Delarozere-Bouillin O. Jusserand Ci. Et Roux P. (1970) :** calcul automatique des “bilans d’eau” mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de turc

**Boukari, M. (1998).** Fonctionnement du système aquifère exploité pour l’approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Ph.D. Thesis, Université Cheick Anta Diop, Dakar.

**BRGM, CGG, CPGF, LCPC (1992).**

– Géophysique appliquée: code de bonne pratique.

**BUSSARD, T., TACHER, L., PARRIAUX, A., BAYARD, D., MAITRE, V. (2004) :**

---

## Références bibliographiques

---

– *Dimensionnement des aires d'alimentation Zu, Document de base*. Protection des eaux, Document environnement n°183, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), UM-183-F. 145 p.

**Chalbaoui M. (2000):** Vulnérabilité des nappes superficielles du Sud-ouest tunisien. *Sécheresse*, 11: 95-101.

**Chikha Belgacem, Debbar Hocine, (2017) :** Etude Hydrologique et Hydrogéologique de la région de Tébessa par application de la télédétection et SIG.

**Debernardi L., De Luca D.A. & Lasagna M. (2008).** Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability. *Environmental geology*, 55: 539-558.

**Degremont. (2005) :** « Mémento technique de l'eau », Deuxième édition Tom1, P 39-50

**DURAND F., PETIT V. (1997) :** Guide pour l'aménagement des captages destinés à l'alimentation en eau potable et leur périmètre de protection immédiate.

Rapport BRGM/RR-39473-FR. 38 p.

**Forster, C. 8., T. E. Lachmar et D. S. Olivier. (1997).** Comparison of Models for Delineating Wellhead Protection Areas in confined to Semi confined Aquifers in Alluvial Basins *Groundwater* ol.35,n o.4, p. 689-697.

**González Vázquez J.C., Grande J.A., Barragán F.J., Ocaña J.A. & De La Torre M.L. (2005):** Nitrate Accumulation and Other Components of the Groundwater in Relation to Cropping System in an Aquifer in Southwestern Spain. *Water Resources Management*, 19: 1-22.

**Grubb, S (1993).** "Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers", *Ground Water*, vol. 31, no 1, 1993, pages 27-32.

[En ligne]. <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/930657859.PDF>.

**Grubb, S. (1993):** "Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers", *Ground Water*, vol. 31, no 1, pages 27-32.

[En ligne]. <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/930657859.PDF>.

**Ikem A., Osibanjo O., Sridhar M.K.C. & Sobande A. (2002):** Evaluation of groundwater quality characteristics near two waste sites in Ibadan and Lagos, Nigeria. *Water, Air, and Soil Pollution*, 140 : 307-333

**Isaaks, E.H., et M.R. SRIVASTAVA (1989):** *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561 pages.

## Références bibliographiques

---

**JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 60 30 (2005):** Rajab 1426 4 septembre 2005, Loi n° 05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.

**Khelili** eloualid, Amara abdellatif (2022): Etude hydrogéologique actualisée de la source El khengha Bekkaria-Tebessa Mémoire de master : Domaine: Sciences de la terre et de l'univers. Filière : Géologie Spécialité: hydrogéologie. Université Larbi Tébessi – Tébessa

**Kouamé** KJ, Jourda JP, Saley MB, Deh SK, Anani AT, Leblanc Y, Cloutier V, Biémi J. (2013). Modeling of Groundwater Flow and Drawdown Evolution Simulation of Abidjan Aquifer (Côte d'Ivoire). *Journal of Asian Scientific Research*, 3(4): 344- 364.

**Kraemer**, S. R. And H. M. Haitjema, (2005). Epa Modeling Tools for Capture Zone Delineation. Presented At National Ground Water Association Ground Water Expo, Marietta, GA, December 13 - 16.

**Kraemer**, S.R., Haitjema, H.M. et Kelson, V.A. (2000): Capture zone delineation for a City wellfield in a valley fill glacial outwash aquifer supporting wellhead protection". Working with WhAEM2000. Office of research and development U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, p. 50

**Krijgsman** B, Lobo-Ferreira JP. (2001). A methodology for delineating wellhead protection areas. Vrije universiteit, Amsterdam and LNEC, Lisboa, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Informaçao de hidraulica INCH7, p. 81.

**Lallemend-Barres** A. & Roux J-C., (1989). Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. *BRGM manuels et Méthode* n° 19.

**Lallemend-Barres** A., (1994). Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. *Etude documentaire préliminaire. R37928. BRGM.*

**Ligban** R., Goné L.D., Kamagaté B., Saley M.B. & Biémi J. (2009) : Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3 : 38-47.

**Lobo-Ferreira** J.P., Krijgsman B. et Feseker (2004): Models for wellhead protection in regional unconfined aquifers and stratified aquifers. Labo. Nacional de Engenharia Civil Hydraulics and Environment Departement, Lisboa, Portugal, Free University Amsterdam, Holland and Departement of Geosciences, University of Bremen, Germany. *Geofisica International*, 43(4): 651-659.

---

## Références bibliographiques

---

**Margat J., (1968).** Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, *Doc. BRGM*, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.

**MINEFQ** (Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec) (1995). *Guide: les Périmètres de Protection autour des Ouvrages de Captage d'eau Souterraine*. Direction des Politiques des Secteurs Agricole et Naturel. Publication du Québec. Sainte-Foy (Québec).

**Paradis, D. (2000).** *Comparaison de méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien*, Mémoire de maîtrise, INRS – Géo-ressources, 142 pages.

[En ligne]. <http://espace.inrs.ca/327/1/Tg00007.pdf>.

**Ramanarayanan, T.S, D.E Strom, M.D. Smolen et M.A. Kizer (1992):** comparison of analytical model and numerical model for delineating wellhead protection areas: In The American Society of agricultural Engineers Meeting Presentation, 922036.

**Touahria Khedidja, (2013) :** Evaluation de la qualité des eaux de forages par comparaison de leurs caractéristiques physicochimiques (région de Tebessa).

**Tredoux G. Et Talma A.S. (2006):** Nitrate pollution of groundwater in southern Africa. In: Xu Y. Et USHER B. (Eds): Groundwater pollution in Africa. Taylor & Francis/Balkema, Leiden, 15-36.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency (2017).** Protect sources of drinking water. Office of Groundwater and Drinking Water, <https://www.epa.gov/sourcewaterprotection>.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1987):** Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. EPA- 440/5-93-001. Office of Groundwater Protection Washington D, C.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1993 a):** Wellhead Protection: A guide for Small Communities EPA/625/R-93/002. Office of Water, Washington D, C.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1993 b):** Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined Fractured and Karst Aquifer Settings. EPA/625/R-93/001. Office of Water, Washington D, C.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1994):** Handbook: Ground Water and Wellhead Protection. EPA/625/R-94/001. Office of Water, Washington D, C.

**Vernoux J.F, Buchet R. (2010) :** Améliorer la protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Guide méthodologique, 67 p.

## Références bibliographiques

---

[http://sigesocc.brgm.fr/IMG/pdf/guide\\_amelioration\\_protection\\_captages\\_eso\\_brgm\\_2010\\_cle86114e.pdf](http://sigesocc.brgm.fr/IMG/pdf/guide_amelioration_protection_captages_eso_brgm_2010_cle86114e.pdf)

**Wyssling, L. (1979):** *Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser- Pumpwerk. Eclogae geologicae Helvetiae 72/2, pS. 401–406.*

**Yesilnacar I.M., Sahinkaya E., Naz M. & Ozkaya B. (2008):** Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran Plain, Turkey. *Environmental geology*, 56: 19-25.