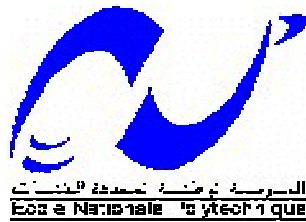


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure & de la Recherche  
Scientifique.

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Hydraulique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur  
d'état en Hydraulique

THEME

ÉTUDE ET TRAITEMENT DE LA CONTAMINATION  
DES EAUX SOUTERRAINES PAR LE FER  
APPLICATION AU FORAGE DE BOUZEGUENE  
(TIZI-OUZOU)

Etudié par : MOUCER Djamel

NACER BEY Slimane

Dirigé par :

Dr A. BERMAD

PROMOTION : JUIN 2010

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons, à témoigner notre sincère reconnaissance à notre promoteur Monsieur A. BERMAD, qui nous a encadré et dirigé ce travail avec rigueur et disponibilité, il nous a inculqué une partie de ses qualités scientifiques grâce à de nombreux conseils et avis, il a su partager son expérience au cours de discussions afin de nous éclairer lors de nos moments de doutes. Ainsi, pour tous les côtés positifs que nous voulons retenir ici, nous voudrions lui exprimer un grand merci.

Un grand merci à Monsieur NAKIB pour ses conseils, au responsable des eaux souterraines de la DHW de la wilaya de Tizi-Ouzou Monsieur YAZIDI pour sa contribution.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation tout le long de notre cursus.

Nos remerciements aux membres du jury pour avoir pris la peine d'évaluer ce modeste travail.

## DEDICACES

A mes parents, qui sont toute ma vie, que Dieu les gardes pour moi.

A mes frères et sœurs, qui ont complété ma vie.

A mon grand père et ma grande mère, à mes oncles, à mes tantes et mes cousins.

A tous les martyres de la Liberté.

A tous ceux qui aiment faire le bien, et aider les gens.

A mes amis surtout KHALED l'architecte.

A toutes ces personnes je dédie ce modeste ouvrage.

*Djamel*

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père, ma mère, mes frères et sœurs.

Ma grande mère, à mes oncles, à mes tantes et mes cousins.

Tous mes amis.

Toute personne lit cette dédicace.

*slimane*  
amel

## ملخص :

المياه المستخرجة من بئر بوزقان تحتوي على كمية كبيرة من عنصر الحديد. و من ثمة عملنا المتمثل في البحث عن خصوصيات الماء و البحث عن الأسباب الجيولوجية التي سببت التلوث و كذلك تبني محطة نزع عنصر الحديد من الماء مع إعطاء القياسات اللازمة لكل مرحلة من التطهير.

الكلمات المفتاحية: البئر- المياه الجوفية-المياه الصالحة للشرب-نزع عنصر الحديد

## **Résumé :**

L'eau brute du forage de BOUZGUENE présente des teneurs élevées en fer, d'où notre travail consiste à identifier les caractéristiques de l'eau, et établi les conditions géologiques qui causent sa contamination et l'adoption d'une station de déferrisation avec dimensionnement des différentes phases de traitement afin de rendre cette eau propre à la consommation humaine.

**Mots clés :** forage, nappes, eau potable, déferrisation.

## **Abstract:**

The raw water of the well of BOUZGUENE that contents raised in iron, from where our work consists in identifying the characteristics of water, and established the geological conditions that cause its contamination and the adoption of a station of deferrisation with dimensionality of the different phases of treatment in order to return this water clean to the human consumption.

Key words: well, water table, drinking water, deferrisation.



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1 :</b> Géométrie de la molécule H <sub>2</sub> O.....	4
<b>Figure I.2 :</b> Polarité de la molécule H <sub>2</sub> O et des liaisons O—H.....	4
<b>Figure I.3 :</b> Diagramme des phases de l'eau (non à l'échelle).....	5
<b>Figure I.4 :</b> Cycle de transformation de l'eau dans la nature.....	12
<b>Figure I.5 :</b> Nappe active.....	18
<b>Figure I.6 :</b> Nappe captive.....	19
<b>Figure I.7 :</b> Nappe alluviale.....	20
<b>Figure I.8 :</b> Nappe phréatique.....	20
<b>Figure II.1 :</b> Diagramme [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] – pH des champs de précipitation de Fe(OH) <sub>3</sub> , FeCO <sub>3</sub> et de FeS, et teneur maxima en [Fe <sup>++</sup> ], [Fe <sup>+++</sup> ] et [FeOH <sup>++</sup> ] dans chacun de ces champs.....	42
<b>Figure II.2 :</b> a, exemple de teneur en <Fe <sup>++</sup> >, avec Eh = 0 ; b, exemple de teneur en <Fe <sup>+++</sup> >, avec Eh = 0.....	43
<b>Figure III.1 :</b> Puits parfait.....	55
<b>Figure III.2 :</b> Puits dans une nappe libre inclinée.....	59
<b>Figure III.3 :</b> Cône de dépression d'un puits, superposé à une surface inclinée d'une nappe.....	59
<b>Figure III.4 :</b> Lignes de courant et équipotentiels autour d'un puits ou forage, dans une nappe inclinée.....	63
<b>Figure III.5 :</b> Puits imparfait.....	65
<b>Figure III.6 :</b> Lignes de courant, équipotentiels, surface libre et courbe de Dupuit dans le cas d'un puits imparfait (d'après Nahrgang, 1956).....	65
<b>Figure III.7 :</b> Forage parfait dans une nappe captive.....	66

<b>Figure III.8 :</b>	a, forage dans une nappe captive et traversant toute l'épaisseur de la couche aquifère;	
	b, forage dans une nappe captive et ne traversant que partiellement la couche aquifère.....	69
<b>Figure IV.1 :</b>	Vue des terres de Bouzeguène depuis <u>Tagounits Aït Yahia</u> .....	70
<b>Figure IV.2 :</b>	Carte représentative de la commune de bouzeguène.....	72
<b>Figure IV.3 :</b>	Coupe verticale du forage.....	77
<b>Figure IV.4 :</b>	Forage imparfait dans une nappe captive inclinée.....	78
<b>Figure IV.5 :</b>	Déferriseur.....	86
<b>Figure IV.6 :</b>	Vanne électromécanique.....	87
<b>Figure IV.7 :</b>	Schéma de principe pour l'installation.....	88
<b>Figure IV.8 :</b>	Schéma du procédé Bi' Eau N°1.....	90
<b>Figure IV.9 :</b>	Schéma du procédé Bi' Eau N°2.....	90
<b>Figure IV.10 :</b>	Diagramme [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] – pH des champs de précipitation de Fe(OH) <sub>3</sub> , FeCO <sub>3</sub> et de FeS, et teneur maxima en [Fe <sup>++</sup> ], [Fe <sup>+++</sup> ] et [FeOH <sup>++</sup> ] dans chacun de ces champs.....	95
<b>Figure IV.11 :</b>	station de déferrisation.....	97
<b>Figure IV.12 :</b>	les dalles d'oxydation.....	98
<b>Figure IV.13 :</b>	Coupes verticale des dalles d'oxydation.....	99
<b>Figure IV.14 :</b>	Circulation sur le marbre.....	101
<b>Figure IV.15 :</b>	bassin de décantation.....	102
<b>Figure IV.16 :</b>	bassin de filtration.....	103
<b>Figure IV.17 :</b>	Coupe verticale du bassin de filtration.....	104
<b>Figure IV.18 :</b>	bassin de récupération.....	107

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Composition isotopique moyenne de l'eau.....	3
<b>Tableau I.2</b> : Principales constantes physiques de l'eau pure.....	6
<b>Tableau I.3</b> : Bilan du cycle de l'eau suivant la saison.....	11
<b>Tableau I.4</b> : Classification des éléments rencontrés dans l'eau.....	13
<b>Tableau II.1</b> : Evolution de la chimie des eaux et du pourcentage de fer particulaire dans des eaux de drainage de tourbières évoluées.....	39
<b>Tableau II.2</b> : Relation entre teneur en H <sub>2</sub> et conditions redox.....	41
<b>Tableau IV.1</b> : Analyse physico-chimiques.....	84
<b>Tableau IV.2</b> : temps d'oxydation en fonction du pH.....	96

# SOMMAIRE

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

## **Chapitre I : L'eau dans la nature**

<b>I.1. L'EAU PURE ET SES PROPRIETES.....</b>	<b>3</b>
I.1.1. Composition et structure de la molécule d'eau.....	3
I.1.2. Différents états de l'eau.....	5
I.1.3. Propriétés physiques de l'eau.....	6
I.1.4. Propriétés chimiques de l'eau.....	8
I.1.5. Propriétés biologiques de l'eau.....	9
<b>I.2. L'EAU DANS LA NATURE.....</b>	<b>9</b>
I.2.1. Éléments du cycle de l'eau.....	9
I.2.2. Répartition de l'eau sur la Terre.....	12
I.2.3. Ressources hydriques naturelles.....	12
<i>I.2.3.1. Eaux superficielles.....</i>	<i>14</i>
<i>I.2.3.2. Eaux souterraines.....</i>	<i>15</i>
<b>I.3. POLLUTION DES EAUX.....</b>	<b>22</b>
<b>I.4. LA PENETRATION ET LES TRAJETS DE LA POLLUTION.....</b>	<b>23</b>
I.4.1. L'entrée et le milieu de la pollution.....	23
I.4.2. Les trajets.....	24
<b>I.5. LES ORIGINES DES POLLUTIONS.....</b>	<b>25</b>
<b>I.6. LES MESURES NECESSAIRES POUR L'EXAMEN DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES EN RAPPORT AVEC LA POLLUTION.....</b>	<b>26</b>

I.6.1. Mesures hydrauliques.....	27
I.6.2. Les mesures biologiques, chimiques et physiques.....	30

**Chapitre II : *La chimie de l'eau dans les nappes***

<b>II.1. LES NOUVELLES DISSOLUTIONS.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2. LES PHENOMENES LIMITANTS.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3. LES CONDITIONS PHYSIQUES ET GEOLOGIQUES DE LA MISE EN SOLUTION DES ATTAQUES CHIMIQUES ET DES REACTIONS.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4. REACTION CHIMIQUES MAJEURES DANS LES NAPPES.....</b>	<b>35</b>
II.4.1. Les échanges avec le sol.....	35
II.4.2. Réaction d'oxydoréduction.....	35
II.4.3. Séquence redox.....	36
II.4.4. Oxygène.....	36
II.4.5. Azote.....	37
II.4.6. Fer.....	38
II.4.7. Soufre.....	39
II.4.8. Carbone.....	40
II.4.9. Hydrogène.....	40
<b>II.5. MISE EN SOLUTION DU FER.....</b>	<b>41</b>
II.5.1. Introduction.....	41

II.5.2. Les caractéristiques du fer dans les eaux souterraines.....	41
II.5.3. Champs de stabilité.....	44
II.5.4. Teneur maxima en ions $\text{FeOH}^{++}$ .....	48
II.5.5. Teneur en fer lorsque $\text{FeCO}_3$ précipite à $25^\circ$ .....	49
II.5.6. Teneur en fer lorsque $\text{Fe}(\text{OH})_3$ précipite à $25^\circ$ .....	50
II.5.7. Teneur en fer lorsque $\text{FeS}$ précipite.....	50
II.5.8. Le fer dans les eaux souterraines d'origine météorique.....	51

### **Chapitre III : Calcul des puits et forages**

<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>55</b>
<b>III.2. Puits et forages parfaits (atteignant l'imperméable), en nappe libre. Mouvement laminaire, alimentation arrière.....</b>	<b>56</b>
III.2.1. L'imperméable est horizontal.....	55
III.2.2. Zone d'émergence ou zone de suintement.....	58
<b>III.3. Puits dans une nappe à surface piézométrique inclinée.....</b>	<b>59</b>
III.3.1. Formule limitante de Wenzel.....	60
III.3.2. Formule du gradient (Wenzel, 1942).....	61
III.3.3. Formule générale.....	62
<b>III.4. Puits et forages en nappes libres et n'atteignant pas le fond imperméable. Puits imparfaits.....</b>	<b>65</b>

**III.5. PUIITS ET FORAGES EN NAPPE CAPTIVE ET ATTEIGNANT L'IMPERMEABLE.MOUVEMENT LAMINAIRE.....66**

III.5.1. La surface piézométrique de la nappe est horizontale.....66

**III.6. PUIITS ET FORAGES EN NAPPE CAPTIVE NE DESCENDANT PAS JUSQU'A L'IMPERMEABLE. PUIITS IMPARFAITS.....68**

**Chapitre IV : Etude et traitement de l'eau du forage de bouzguène**

**IV.1. PRESENTATION DE LA REGION DE BOUZGUENE.....70**

IV.1.1. Présentation géographique.....70

IV.1.2. Aperçu stratigraphique et tectonique.....72

**IV.2. LA PROBLEMATIQUE.....75**

**IV.3. ETUDE SUR LES CAUSE DE CONTAMINATION.....75**

IV.3.1. Type de la nappe.....75

IV.3.2. Le forage.....76

IV.3.3. zone d'appel.....79

IV.3.4. Les facteurs qui favorisent la contamination selon notre géologie.....80

**IV.4. LE TRAITEMENT.....81**

IV.4.1. Avantages et inconvénients de la présence du fer dans les eaux.....81

IV.4.2. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de forage.....83

IV.4.3. Les procédés préconisés pour la déferrisation.....85

<i>IV.4.1. Procédé du BIRM.....</i>	<i>85</i>
<i>IV.4.2. Le procédé bi 'eau.....</i>	<i>89</i>
<i>IV.4.3. Unité de déferrisation.....</i>	<i>93</i>
<i>IV.4.4. Critique des trois procédés et le choix de la technique adéquate.....</i>	<i>94</i>
<i>IV.4.5. Conception de la station de traitement.....</i>	<i>95</i>
<i>IV.4.5.1. Aération.....</i>	<i>97</i>
<i>IV.4.5.2. Circulation sur le marbre blanc concassé (Décarbonatation).....</i>	<i>100</i>
<i>IV.4.5.3. Bassin stabilisateur.....</i>	<i>101</i>
<i>IV.4.5.4. Bassin de décantation.....</i>	<i>101</i>
<i>IV.4.5.5. Bassin de filtration.....</i>	<i>103</i>
<i>IV.4.5.6. Bassin de récupération.....</i>	<i>107</i>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>108</b>



# INTRODUCTION GÉNÉRALE



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### INTRODUCTION GENERALE

Les eaux destinées à la consommation humaine sont en générale des eaux souterraines ou sinon des eaux de surface. Dans certaines conditions, les eaux de mer peuvent, après dessalement, être utilisées.

Les eaux souterraines sont normalement bien protégées par le sol et, de ce fait, rarement polluées par les activités humaines. Cependant, on constate de plus en plus de cas de pollutions notamment par des ions nitrates, des résidus de pesticides (ou de leurs métabolites), de solvants chlorés...

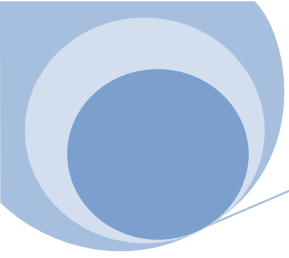
Certaines eaux souterraines peuvent être naturellement impropres à la consommation humaine du fait d'un contact prolongé avec des minéraux dans des conditions physico-chimiques particulières, notamment une absence d'oxygène. Des minéraux peuvent alors se dissoudre et libérer des éléments en quantités trop importantes. Les eaux ne sont alors plus aptes à être destinées, en l'état, à l'alimentation humaine, car elles sont souvent chargées : en fer, arsenic, sélénium, antimoine, nickel...

Dans le souci d'améliorer les conditions d'approvisionnement en eau potable de la population de Bouzguène (Tizi-Ouzou), un forage a été réalisé, l'eau a jailli en surface et en quantité. Si la population dispose d'eau souterraine en quantité, le défi reste à relever en ce qui concerne la qualité.

En effet, après la foration et avant la livraison de l'ouvrage à la population, quelques analyses chimiques et physico-chimiques ont été faites pour s'assurer de la potabilité de l'eau. Par la suite, les analyses ont révélé la présence du fer en excès.

La mauvaise qualité de l'eau du forage pose un problème de santé publique, et donc, c'est très important d'identifier l'eau du forage, en commençant par son origine et les conditions géologiques qui causent sa contamination, ensuite en passant par ses caractéristiques physico-chimiques, il s'est avéré que la conception d'une station de déferrisation est obligatoire pour potabiliser l'eau.

Notre travail a débuté par une visite à la commune de Bouzguène (village Ikoussa). L'objectif de notre visite était de glaner le maximum d'informations concernant la



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

topographie et la géologie de la région, la situation du forage, et les caractéristiques apparentes de l'eau comme l'odeur et la couleur.

Dans le premier chapitre, on a présenté les caractéristiques et les propriétés physico-chimiques de l'eau, ainsi que sa répartition sur la terre, et les différentes nappes souterraines.

Les conditions qui favorisent la mise en solution des minéraux dans les nappes, et les domaines de précipitation du fer ont été présentées dans le chapitre deux.

Dans le troisième chapitre, on a donné les formules générales pour le calcul de différents types du forage (parfait et imparfait), dans les différents types de nappe.

Après avoir présenté la région de Bouzguène et sa géologie dans le chapitre quatre, on a discuté de l'origine du fer dans l'eau du forage, et après avoir critiqué les analyses qui ont été faites sur l'eau, on a opté pour un traitement physico-chimique par une station de déferrisation.

CHAPITRE I

L'EAU DANS LA  
NATURE

## I.1. L'EAU PURE ET SES PROPRIETES [1]

### I.1.1. Composition et structure de la molécule d'eau

Bien que la formule  $H_2O$  soit relativement simple, il existe de très nombreuses combinaisons possibles des éléments hydrogène et oxygène qui comportent chacun plusieurs isotopes. L'eau pure est donc un mélange de plusieurs molécules, chimiquement identiques, mais ayant des propriétés physiques distinctes.

Cependant, l'eau ordinaire est constituée essentiellement de molécules  $^1H_2\ ^{16}O$ , comme le montre le tableau I.1 qui donne la composition isotopique moyenne de l'eau.

**Tableau I.1 :** *Composition isotopique moyenne de l'eau*

molécules	Abondance relative (% en masse)
$^1H_2\ ^{16}O$	99,70
$^2H_2\ ^{16}O$	0,000002
$^3H_2\ ^{16}O$	Traces
$^1H_2\ ^{18}O$	0,20
$^1H_2\ ^{17}O$	0,04
$^1H^2H\ ^{16}O$	0,03

La molécule d'eau est constituée d'un édifice électronique stable, qualitativement semblable au néon, qui cependant ne réalise pas un équilibre électrique parfait.

En effet, à cause de l'électronégativité marquée de l'oxygène, et de sa tendance à accaparer les deux électrons d'hydrogène, il s'ensuit une déformation de la structure à l'origine des caractéristiques géométriques essentielles de la molécule d'eau, qui est dissymétrique et conforme au schéma angulaire de la figure I.1.

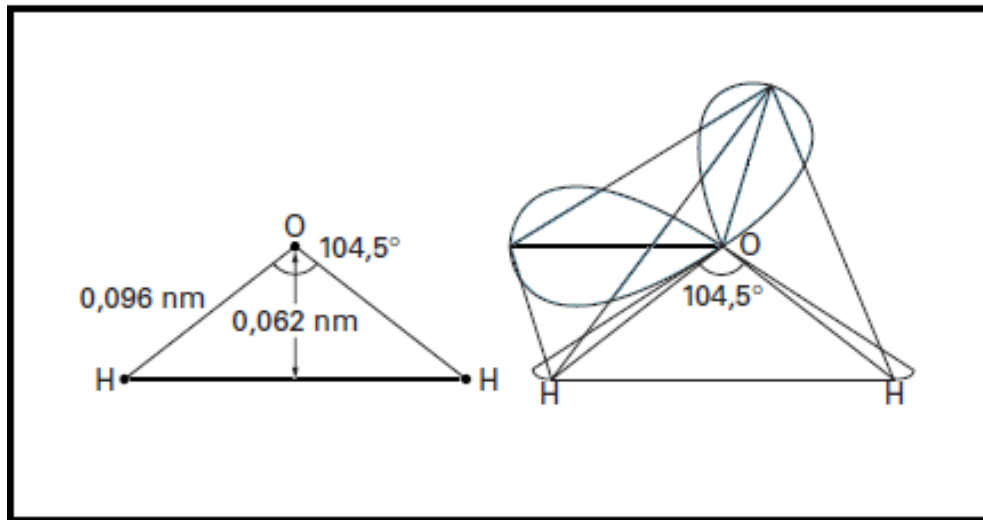


Figure I.1 : Géométrie de la molécule H<sub>2</sub>O

Du point de vue électrique, cela se traduit par un caractère polaire de la molécule d'eau (figure I.2), présentant un moment électrique permanent, qui permet d'expliquer les extraordinaires, pour ne pas dire aberrantes, propriétés de l'eau, qui font qu'elle n'a pas les caractéristiques d'un liquide parfait.

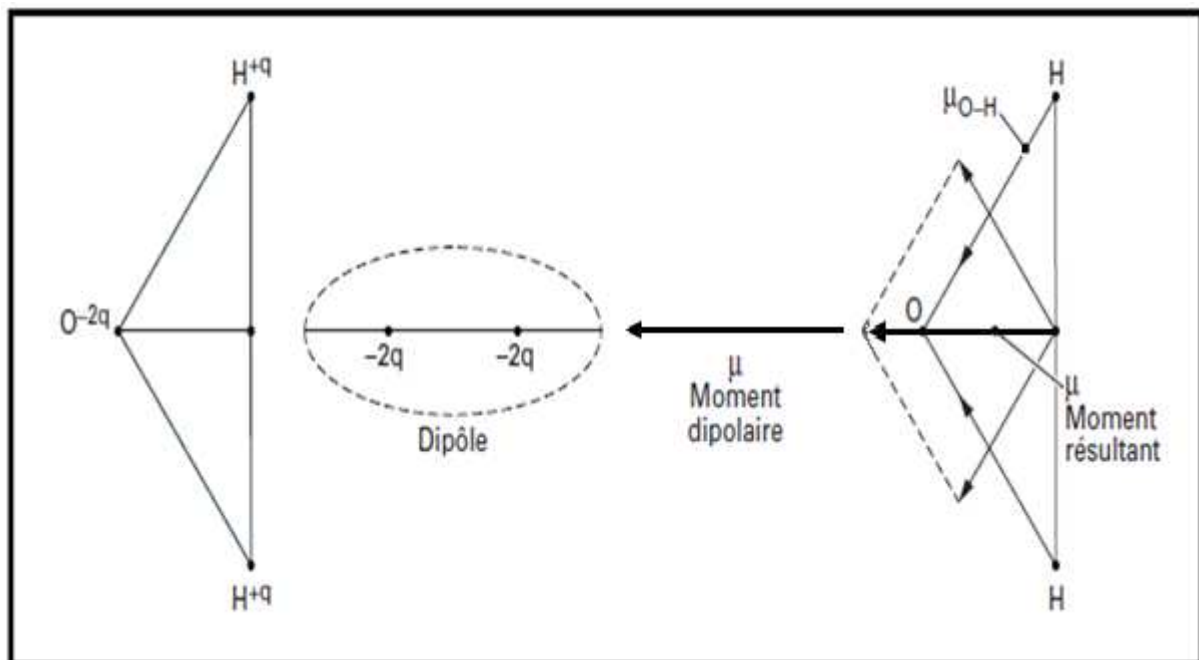


Figure I.2 : Polarité de la molécule H<sub>2</sub>O et des liaisons O—H

I.1.2. Différents états de l'eau

Comme pour la plupart des corps, l'eau peut se présenter sous trois états ou phases : solide (glace), liquide (eau proprement dite), et gazeux (vapeur d'eau).

Ces trois phases coexistent dans la nature, toujours observables deux à deux, et plus ou moins en équilibre : eau-glace, glace-vapeur, eau-vapeur, selon les conditions de température et de pression.

Il existe cependant un point, dit point triple (figure I.3) pour lequel les trois phases sont rigoureusement en équilibre, à la température de 0,01 °C et sous une pression de 4,6 mm Hg (613 Pa).

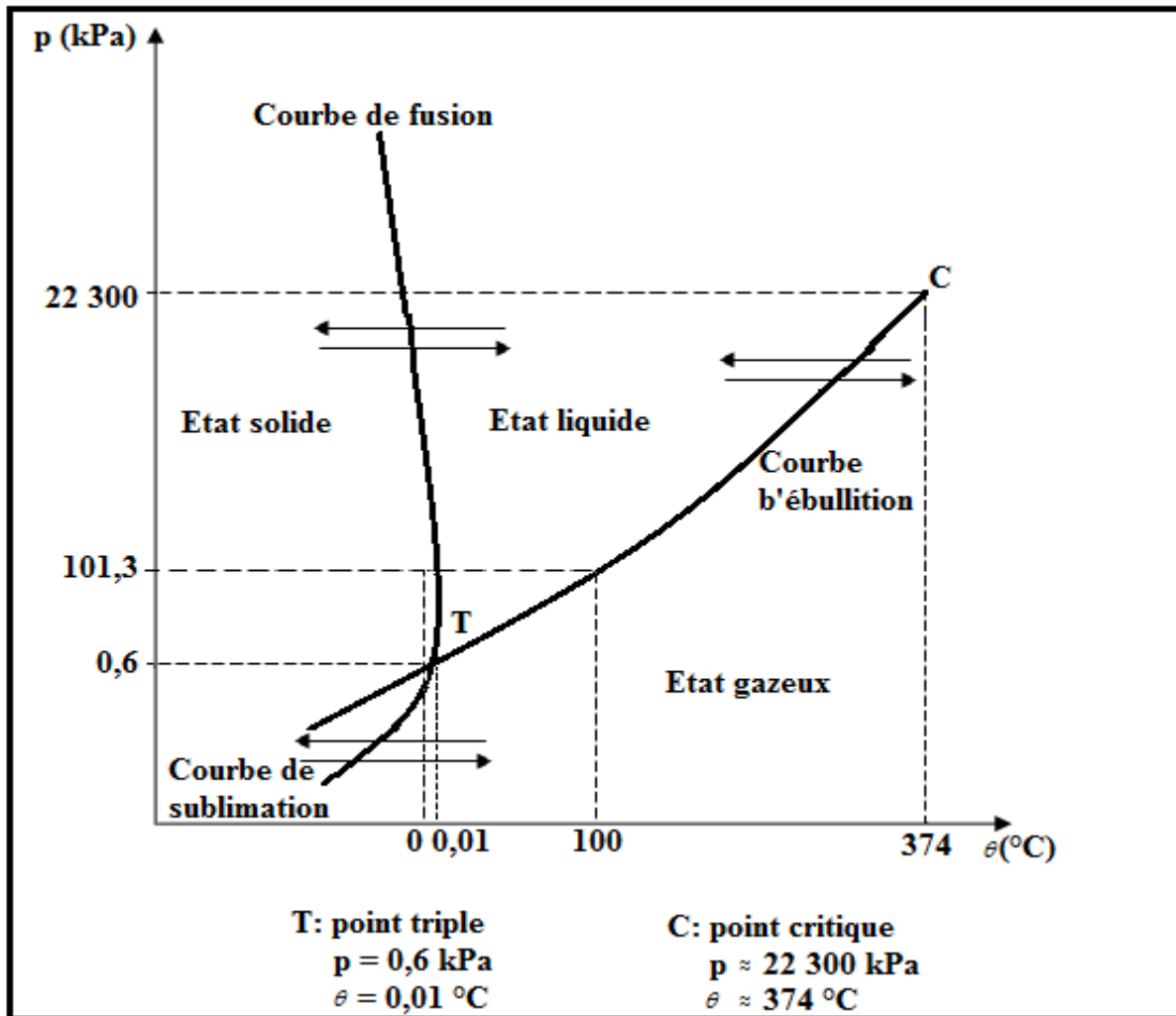


Figure I.3 : Diagramme des phases de l'eau (non à l'échelle)

### I.1.3. Propriétés physiques de l'eau

Les valeurs des principales constantes physiques de l'eau sont rassemblées dans le tableau I.2. Le caractère polaire de la molécule d'eau est à l'origine d'associations possibles entre les molécules d'eau ; il donnera lieu à bien des anomalies physiques que nous signalons brièvement.

**Tableau I.2 :** Principales constantes physiques de l'eau pure

<b>Eau liquide</b>	
Température d'ébullition sous 760 mm Hg (101 325,02 Pa)	100 °C
Capacité thermique massique à 15 °C	4,186 8 J/ g
Enthalpie de vaporisation à 100 °C	2 252,5 J/ g
Conductivité thermique à 20°C	5,98 mW/ (cm.K)
Résistivité à 20 °C	23,8 MΩ . cm
Permittivité relative $\epsilon$ à 20 °C	80
Indice de réfraction pour la raie D à 10 °C	1,333 00
Masse volumique à 4 °C	1 g/ cm <sup>3</sup> (par définition)
<b>Eau solide</b>	
Température de fusion	0 °C (par définition)
Capacité thermique massique	2,093 4 J/ g
Enthalpie de fusion sous 760 mm Hg (101 325,02 Pa)	333,27 J/ g
Tension de vapeur à 0 °C	877,128 Pa
Permittivité relative $\epsilon$	3,26
Indice de réfraction pour la raie D	1,309 07
Densité (par rapport à l'eau à 4 °C)	0,916 49 ± 0,0007
<b>Eau vapeur</b>	
Conductivité thermique à 100 °C	0,231 mW/ (cm.K)
Densité par rapport à l'air	0,623 37
Indice de réfraction pour la raie D à 100 °C	1,002 59



➤ **Température d'ébullition**

Anormalement élevée, si on la compare avec celle de composés de masse moléculaire du même ordre, possédant plusieurs atomes d'hydrogène.

➤ **Masse volumique**

Elle varie avec la température et la pression, mais aussi avec la teneur en sels dissous.

➤ **Viscosité**

Elle diminue lorsque la température croît ; par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée, rend l'eau moins visqueuse aux basses températures.

➤ **Tension superficielle**

Elle est extrêmement élevée ; égale à  $73 \times 10^{-3}$  N/m à 18 °C et  $52,5 \times 10^{-3}$  N/m à 100 °C.

L'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle, les tensioactifs par contre la diminuent.

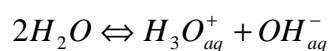
➤ **Permittivité relative  $\epsilon$**

Elle est particulièrement élevée  $\epsilon = 80$  (à 20 °C) par rapport à d'autres liquides. C'est ce qui explique le pouvoir ionisant très important de l'eau.

➤ **Conductivité électrique de l'eau**

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau pure à 20 °C est  $4,2 \times 10^{-6}$  S/m ce qui correspond à une résistivité très élevée de  $23,8 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ .

Cette conductivité très faible mais jamais nulle de l'eau est expliquée par une légère dissociation de la molécule d'eau en ions selon l'équation chimique :



Cet équilibre est caractérisé quantitativement par sa constante d'équilibre ou produit ionique :

$$K_e = [H_3O_{aq}^+] [OH_{aq}^-]$$

Avec  $[H_3O_{aq}^+]$  et  $[OH_{aq}^-]$  concentrations molaires en ions.

Dans le cas de l'eau pure, la fraction des molécules ainsi dissociées est extrêmement faible, comme l'indique la valeur de la constante d'équilibre de dissociation qui varie, par ailleurs, de façon notable avec la température :

à 20 °C

$$[H_3O_{aq}^+] [OH_{aq}^-] = 10^{-14}$$

et

$$[H_3O_{aq}^+] = [OH_{aq}^-]$$

d'où

$$[H_3O_{aq}^+] = \sqrt{K_e} = 10^{-7}$$

Ce qui permet de définir la notion de pH (grandeur sans unité) par la relation :

$$pH = -\lg[H_3O_{aq}^+] = 7$$

ou, ce qui est équivalent par la relation :

$$[H_3O_{aq}^+] = 10^{-pH}$$

#### I.1.4. Propriétés chimiques de l'eau

L'eau est, par ses propriétés électriques et sa constitution moléculaire, particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides.

La solvation (ou action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi de nouvelles structures : il se produit une véritable réaction chimique.

Une solvation complète est une dissolution.

Si la solvation s'exerce sans que la matière se disperse spontanément dans l'eau, on tend vers une peptisation qui correspond à la solution colloïdale.

Si la solvatation n'est que superficielle, on obtient une suspension colloïdale ou une gelée, suivant que le corps est mouillable ou gonflable (hydrophilie).

Certains corps favorisent la dissolution, la peptisation ou hydrophilie. On les désigne sous les noms de solubilisants, peptisants, émulsionnants, stabilisants, agents de mouillage.

La dissolution des corps minéraux engendre une ionisation, c'est-à-dire la dissociation des molécules formant le cristal minéral, avec apparition d'ions chargés électriquement dotés d'une certaine mobilité en solution. En effet si on produit un champ électrique continu, les ions vont se déplacer (vers la cathode pour les cations + et vers l'anode pour les anions -) en provoquant le passage d'un courant.

### I.1.5. Propriétés biologiques de l'eau

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des êtres vivants.

Il existe un cycle biologique, cycle au cours duquel s'effectue une série d'échanges. L'eau entre pour une grande part dans la constitution des êtres vivants. Pour l'homme, on cite les pourcentages suivants :

— nouveau-né ..... 66 à 74 %

— adulte..... 58 à 67 %

L'eau compose la plus grande partie de nos aliments :

— laitue ..... 92 %

— pomme de terre ..... 78 %

— poulet..... 72 %

## I.2. L'EAU DANS LA NATURE

### I.2.1. Éléments du cycle de l'eau

L'eau sous ses différents états physiques (gazeux, liquide, solide) suit un vaste cycle dans la nature.

*(a) Précipitations*

La vapeur d'eau atmosphérique se condense en nuages qui engendrent les précipitations sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Ces précipitations constituent actuellement l'origine de presque toutes nos réserves en eau douce. Elles sont très variables d'une région à l'autre suivant le climat et le relief qui sont les facteurs essentiels. La mesure des précipitations s'exprime par la valeur de la lame d'eau moyenne tombée annuellement à un endroit considéré. Cette valeur qui est nulle dans les régions désertiques peut atteindre jusqu'à 14 m/an dans l'Himalaya. Le volume total des précipitations sur les continents est estimé à environ 100 000 km<sup>3</sup>/an.

*(b) Ruissellement*

Parvenue sur le sol, une partie des précipitations s'écoule à sa surface vers le réseau hydrographique et les étendues d'eau libre (lacs, mers, océans), c'est le ruissellement de surface. Il ne faut pas confondre ce ruissellement avec l'écoulement qui comprend en plus le déversement des nappes souterraines.

*(c) Évapotranspiration*

C'est la somme de toutes les pertes par transformation d'eau en vapeur. On distingue deux composantes :

— **l'évaporation** constituée par le retour direct de l'eau à l'atmosphère et qui est un phénomène purement physique dépendant en particulier du déficit hygrométrique, c'est-à-dire de la différence entre la pression de vapeur saturante à la température considérée et la pression de vapeur réelle.

— l'autre composante est constituée par **la transpiration des plantes** qui est égale au volume d'eau transitant par les plantes et nécessaire à leur croissance. On l'estime de 300 à 1 000 L d'eau par kilogramme de matière sèche végétale. La transpiration se produisant par les feuilles, l'eau contenue dans la plante est constamment renouvelée par les racines qui « pompent » l'humidité du sol. La transpiration est loin d'être un phénomène négligeable.

**Exemple :** une forêt de hêtres transpire annuellement 70 à 540 mm d'eau suivant son âge.

*(d) Infiltration*

Une partie des précipitations pénètre dans le sol et dans le sous-sol où elle alimente les eaux souterraines constituant le stock d'eau du sol et les réserves des nappes aquifères. Une

partie de ces eaux souterraines retournera naturellement ou artificiellement à la surface du sol d'où elle participera à l'écoulement général où à l'évapotranspiration.

*(a) Cycle de l'eau*

En définitive, il existe une circulation de l'eau analogue à celle que provoquerait un gigantesque appareil distillatoire. Le cycle se trouve donc fermé comme le montre le schéma de la figure I.4, ce qui se traduit par un bilan global exprimant l'égalité des pertes et des gains :

$$\text{Précipitations} = \text{ruissellement} + \underbrace{\text{évaporation} + \text{transpiration}}_{\text{évapotranspiration}} + \text{infiltration}$$

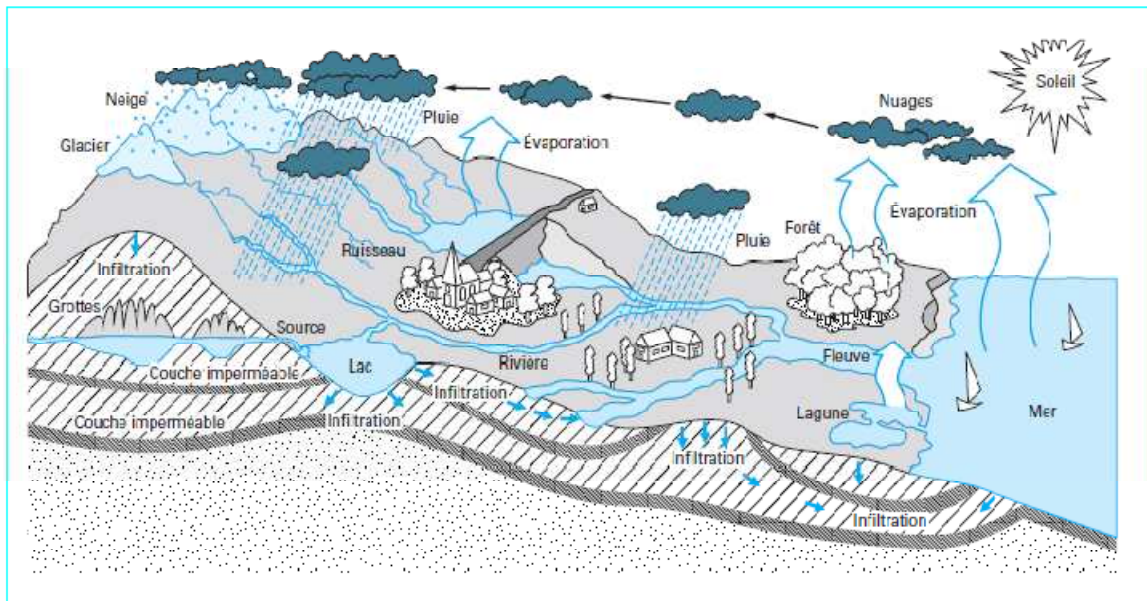
Les éléments du bilan hydrologique peuvent être évalués localement dans des installations expérimentales appelées lysimètres qui utilisent le sol lui-même comme appareil de mesure.

Sous nos climats et dans une région de sol sédimentaire, les éléments du bilan se décomposent suivant la saison comme indiqué dans le tableau I.3.

**Tableau I.3 :** *Bilan du cycle de l'eau suivant la saison*

<b>Etape</b>	<b>En été</b>	<b>En hiver</b>
Ruissellement	15%	25%
Evaporation	25%	10%
Infiltration	25%	65%
Transpiration	35%	

Les chiffres du tableau I.3 nous montrent l'influence des précipitations hivernales pour la constitution des réserves, principalement pendant la fonte des neiges. Toutes ces données sont des données moyennes, car elles dépendent de la topographie et de la nature de la roche constitutive du sol.



*Figure I.4 : Cycle de transformation de l'eau dans la nature*

### 1.2.2. Répartition de l'eau sur la Terre

1 milliard 340 millions de  $\text{km}^3$  (soit  $1,34 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ), un volume impossible à se représenter et pourtant c'est la quantité totale d'eau se trouvant sur notre planète, cela sur une surface de l'ordre de 510 millions de  $\text{km}^2$ .

Les océans, les mers et lacs salés constituent plus de 97 % de ce volume total d'eau ; cette eau salée s'avère très difficilement utilisable car les dispositifs de dessalement conduisent à des coûts de l'eau très onéreux voir prohibitifs. Il ne reste en définitive sur la terre que de l'ordre de 2,8 % sous forme d'eau douce dont 2,2 % sur les glaciers et calottes polaires (donc pas utilisables) et seulement 0,6 % qui sont répartis entre l'atmosphère et les eaux continentales constituées par les eaux superficielles (rivières, fleuves et lacs) et les eaux souterraines accumulées dans le sol et sous-sol.

Le véritable problème qui se pose est en réalité l'accessibilité de ces réserves en eau douce et leur localisation très irrégulièrement répartie, ce qui explique que souvent certaines régions du globe sont très défavorisées.

### 1.2.3. Ressources hydriques naturelles

L'homme à recours généralement, pour satisfaire ses propres besoins (production d'eau pour la consommation humaine) et permettre l'usage de l'eau dans ses diverses activités industrielles et agricoles, à deux types de ressources naturelles :

- les eaux superficielles ou de surface (de rivières, fleuves et lacs...);
- les eaux souterraines.

L'eau à l'état naturel, superficielle ou souterraine, n'est jamais « pure » ; c'est un milieu vivant qui se charge très rapidement de divers éléments en contact des milieux qu'elle traverse et sur lesquels elle ruisselle.

Ces éléments peuvent être présents dans l'eau sous les trois états (gaz, solide, liquide), posséder un caractère organique ou minéral et à l'état particulaire avoir des dimensions très variables (figure I.1).

Une classification très succincte des éléments rencontrés dans l'eau permet d'établir le tableau I.4.

Nous procéderons ci-après à une analyse de l'origine et des caractéristiques générales (sur le plan de la qualité) de la ressource.

**Tableau I.4 :** *Classification des éléments rencontrés dans l'eau*

Etat ou forme des éléments	Nature des éléments						
Matières en suspension	Sables, argiles, boues diverses. Roches en débris, matières organiques, minérales et végétales. Débris divers insolubles.						
Matières en émulsion	Matières organiques colloïdales. Huiles minérales, goudrons, suies, pétrole, argiles colloïdales.						
Matières organiques solubilisées	Tourbes, déchets végétaux, matières azotées. Produits de synthèse organique solubles, etc.						
Sels minéraux	<table style="display: inline-table; border: none; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="border: none;">carbonates bicarbonates sulfates chlorures nitrates, etc.</td> <td style="border: none; font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> <td style="border: none; vertical-align: middle;">de</td> <td style="border: none;"> <table style="display: inline-table; border: none; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="border: none;">calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.</td> <td style="border: none; font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	carbonates bicarbonates sulfates chlorures nitrates, etc.	}	de	<table style="display: inline-table; border: none; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="border: none;">calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.</td> <td style="border: none; font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> </tr> </table>	calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.	}
carbonates bicarbonates sulfates chlorures nitrates, etc.	}	de	<table style="display: inline-table; border: none; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="border: none;">calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.</td> <td style="border: none; font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> </tr> </table>	calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.	}		
calcium magnésium sodium potassium ammonium, etc.	}						
Organismes vivants d'origine végétale, animale, bactérienne et virale	Plancton, algues, champignons, vers, larves d'insectes, larves, bactéries, amibes, virus, etc.						
Gaz	Oxygène, azote, dioxyde de carbone, ammoniac.						

### *1.2.3.1. Eaux superficielles*

Elles sont constituées par toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents.

Elles ont pour origine soit les eaux de ruissellement, soit les nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseau puis de rivière.

Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable.

Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (étangs et lacs) ou artificielles (retenues, barrages) caractérisées par une surface d'échange eau-atmosphère quasiment immobile, une profondeur qui peut être importante et un temps de séjour souvent élevé.

Il s'agit d'une ressource facilement accessible mais malheureusement fragile et vulnérable, la pollution la rendant souvent impropre à l'utilisation en l'absence d'un traitement préalable.

### **Quelques notions d'hydrologie physique**

➤ On appelle **bassin versant** ou **bassin hydrologique** une zone de relief dont les eaux de ruissellement de surface s'écoulent et se rassemblent vers un exutoire unique (par exemple, l'embouchure d'un fleuve). Il est déterminé par la configuration géographique et délimité par une ligne de crête et de partage des eaux.

➤ Le **réseau hydrographique** est constitué par l'ensemble des fleuves et des rivières. Il est d'autant plus développé que le sol est moins perméable. On définit la densité du réseau hydrographique qui est égale au quotient de la surface du bassin par le nombre de cours d'eau (y compris les cours d'eau temporaires), ainsi que le coefficient de drainage, rapport entre la surface du bassin et la longueur totale des cours d'eau.

➤ L'**écoulement** est égal à la somme du ruissellement de surface et du déversement des nappes souterraines. C'est la quantité d'eau qui circule dans le réseau hydrographique.

➤ On appelle **déficit à l'écoulement** la différence entre la lame d'eau tombée (mesurée à l'aide d'un réseau de pluviomètres) et la lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant. Cette dernière est mesurée grâce au débit de l'exutoire unique qui est en général un fleuve dans une station de jaugeage.



La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. Par échange à la surface eau-atmosphère, l'eau va se charger en gaz dissous (oxygène, azote, dioxyde de carbone).

Les **eaux de surface** se caractérisent par :

- les variations saisonnières (car climatique) et, à degré moindre, journalières des paramètres physiques : température, turbidité et coloration. Les concentrations en matières solides finement dispersées ou à l'état colloïdal peuvent être importantes tout en étant aléatoires suite à des pluies soudaines, des orages et des pollutions accidentelles ;
- la présence fréquente de matières organiques d'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes animaux et végétaux après leur mort ;
- le développement plus ou moins important de phytoplancton (algues) et zooplancton et, dans certaines conditions, d'une vie aquatique intense ;
- la fragilité de cette ressource très vulnérable à la pollution d'origine urbaine, industrielle et agricole. On y rencontre par suite très souvent une micropollution minérale (métaux lourds) ou organique (hydrocarbures, solvants, phénols, pesticides, herbicides, etc.) pouvant avoir un caractère toxique et des substances azotées et phosphorées à l'origine des phénomènes d'eutrophisation.

Sur le plan bactériologique, les eaux sont contaminées plus ou moins par des bactéries (dont certaines pathogènes) et des virus.

### ***1.2.3.2. Eaux souterraines***

#### **(a) Définitions**

Les eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère. La nappe chemine en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau.

Les nappes souterraines fournissent ainsi presque le tiers du débit total de tous les cours d'eau de la planète, soit environ 12 000 kilomètres cubes d'eau par an.

Les eaux souterraines cheminent à des vitesses très différentes qui dépendent de la nature des sols : plus la taille des porosités du sol est grande, plus la vitesse est rapide.

Dans les régions karstiques, les eaux de pluie s'engouffrent rapidement par les fissures et les avens et circulent à grande vitesse dans les galeries souterraines (jusqu'à quelques centaines de mètres par heure). Les eaux souterraines forment alors de véritables lacs et rivières souterrains, les lacs pouvant avoir jusqu'à 100 mètres de long et les rivières parcourir jusqu'à 10 kilomètres en souterrain.

Mais le plus souvent, le périple souterrain des eaux de pluie prend du temps : dans les régions constituées de calcaire ou de granite peu fissuré, de craie, de sable ou d'alluvions, leur infiltration est lente (quelques mètres par an dans les sables fins). L'eau remplit progressivement les moindres interstices, les pores de la craie, les petites fissures des granites ou des calcaires durs, ou encore les vides laissés entre les grains de sable ou de graviers. Les nappes ainsi formées ne sont jamais des étendues d'eau libre, mais des couches de terrain saturées d'eau. Leur écoulement est paresseux et les distances parcourues peuvent être très longues. Ce lent voyage permet au flux de l'eau de se régulariser, et aux nappes d'alimenter de manière régulière les cours d'eau, malgré le caractère erratique des pluies. Même en période de sécheresse, elles peuvent parfois continuer à ravitailler les cours d'eau pendant des années. Les eaux souterraines ont donc un rôle de régulation extrêmement important. Ce sont elles qui alimentent ce que l'on appelle le " débit de base " des cours d'eau ou débit d'étiage. Mais toutes les nappes ne sont pas d'aussi bonnes régulatrices du débit d'eau : les nappes libres en sont d'excellentes, contrairement aux nappes captives.

Il est bien sûr possible d'exploiter cette ressource en puisant l'eau directement dans les nappes. Mais si l'on veut conserver l'aptitude de ces eaux à réguler les flux, il faut prêter attention à ne pas prélever plus d'eau que l'écoulement naturel ne peut en offrir. Il n'est donc pas recommandé de puiser dans une nappe sans en connaître au préalable le comportement, si l'on ne veut pas risquer un épuisement irréversible. Certaines nappes, notamment, ne sont plus du tout approvisionnées en eau aujourd'hui : leur exploitation, comme celle de n'importe quel gisement fossile (pétrole, charbon, gaz,...), ne peut donc que conduire à leur assèchement progressif.

C'est le cas par exemple des nappes profondes et captives de certains bassins sédimentaires qui ne sont quasiment plus en relation avec le réseau hydrologique superficiel et que les eaux de pluie ne peuvent atteindre. C'est aussi le cas de certaines nappes libres des régions désertiques.

Aquifère :

Formation géologique souterraine, formée de roches poreuses ou fissurées, dans laquelle l'eau peut s'infiltrer, s'accumuler et circuler; le mot aquifère désigne à la fois le contenant (les roches) et son contenu (l'eau).

Sous nos latitudes, les aquifères sont alimentés principalement en hiver car durant cette période le phénomène d'évaporation est faible, l'humidité des sols favorise l'infiltration, et les plantes, qui vivent au ralenti, consomment peu d'eau. Les eaux souterraines reconstituent donc leurs réserves à cette époque de l'année. En été en revanche, elles n'accumulent plus d'eaux nouvelles et leur niveau baisse. Mais elles continuent à alimenter les cours d'eau sauf lorsque l'hiver a été trop sec, auquel cas elles peuvent se tarir. De même, dans les pays tropicaux secs, les nappes reconstituent leur réserve durant la saison des pluies. Mais elles s'épuisent au cours de la saison sèche qui dure longtemps et les cours d'eau finissent le plus souvent par tarir. Dans les régions au climat aride, les pluies sont trop exceptionnelles même en hiver pour pouvoir humidifier les sols en profondeur. Leurs eaux s'évaporent, ou servent à alimenter la très rare végétation, ou encore ruissellent sur les sols secs pour aller rejoindre quelques cours d'eau occasionnels appelés des oueds. L'eau peut s'infiltrer en revanche au fond de ces oueds lors de leurs crues passagères et aller alimenter des nappes libres. Celles-ci sont donc toujours situées en profondeur dans les sédiments du lit des oueds. En été cependant, ceux-ci se tarissent et les eaux des nappes, qui débouchent à l'air libre, s'évaporent au soleil.

La surface supérieure de la nappe est appelée surface piézométrique. L'altitude de chaque point de cette surface est appelé niveau piézométrique qu'il ne faut pas confondre avec le niveau hydrostatique d'une surface d'eau libre. La forme de la surface piézométrique peut être déterminée par des sondages. Cette forme est fonction du niveau et du débit de l'exutoire ainsi que de la perméabilité du terrain.

Nappe :

Nappe se dit aussi de la masse d'eau étendue sous des couches de terrain plus ou moins épaisses, et à laquelle on donne issue par les puits artésiens ou autres.

Les nappes d'eaux souterraines peuvent être de deux types selon qu'elles circulent sous une couche perméable ou non.

**(b) Différents types de nappes**

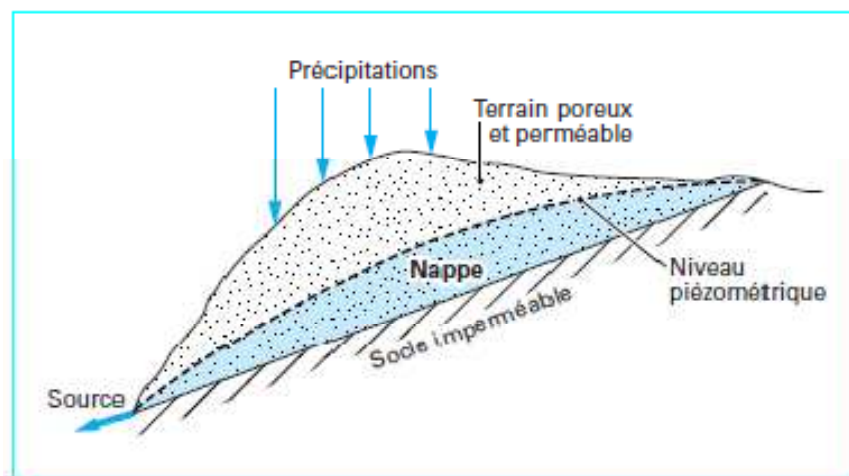
Selon les conditions géologiques, on peut distinguer différents types de nappes.

**(i) Nappe active (ou nappe libre)**

C'est une nappe due à la succession d'une couche imperméable surmontée d'une roche-magasin (figure I.5). L'ensemble du dispositif peut être affecté d'une pente plus ou moins forte.

La nappe est alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement. Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue.

L'équilibre hydraulique entre pluviométrie et réserve est assuré par le trop-plein qui constitue les sources. Celles-ci apparaissent en des points particuliers dus principalement à la topographie de la couche imperméable. Le niveau supérieur de la nappe piézométrique s'établit uniquement en fonction de la perméabilité du terrain à travers lequel pénètre l'eau d'infiltration.

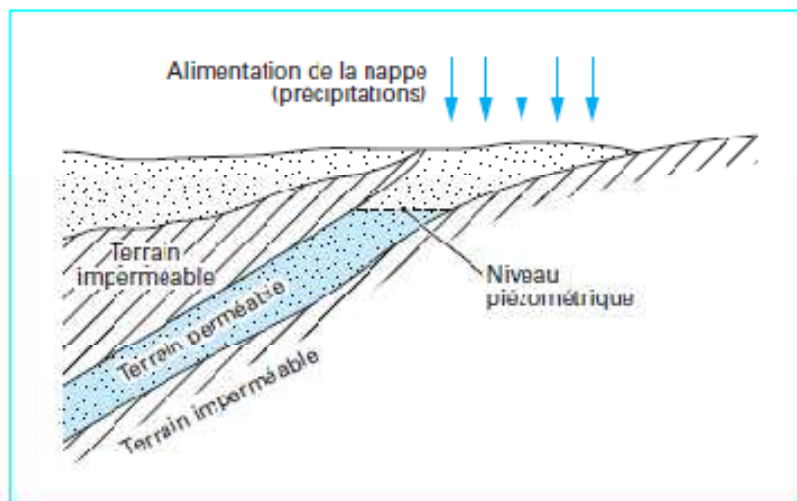


*Figure I.5 : Nappe active*

**(ii) Nappe captive**

Les nappes situées entre deux couches imperméables sont dites captives car leur niveau ne peut monter, l'eau ne pouvant s'insinuer dans un sol imperméable Figure(I.6).

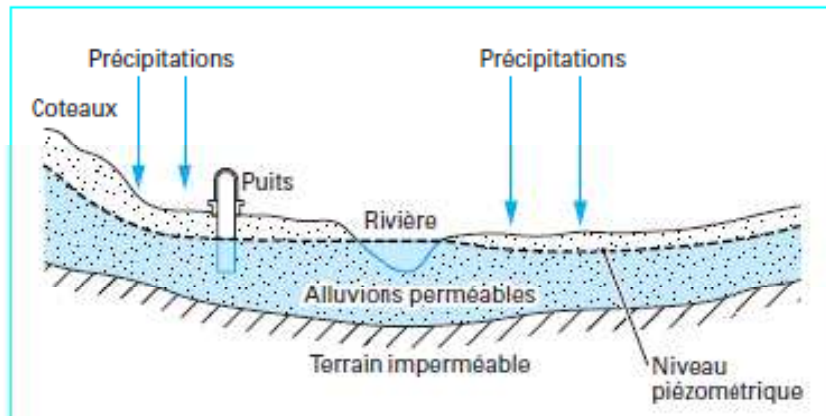
Ces nappes n'ont qu'un lien ténu avec la surface par où elles sont alimentées et qui correspond à la zone où la couche perméable affleure. De telles nappes se renouvellent donc plus lentement que les nappes libres. Elles sont en général profondes, quelques centaines de mètres et plus, et si leur pente est forte, l'eau y est sous pression. La pression est même parfois suffisante pour que le creusement d'un puits permette à l'eau de jaillir en surface : une telle nappe est alors dite artésienne.



*Figure I.6 : Nappe captive*

**(iii) Nappe alluviale**

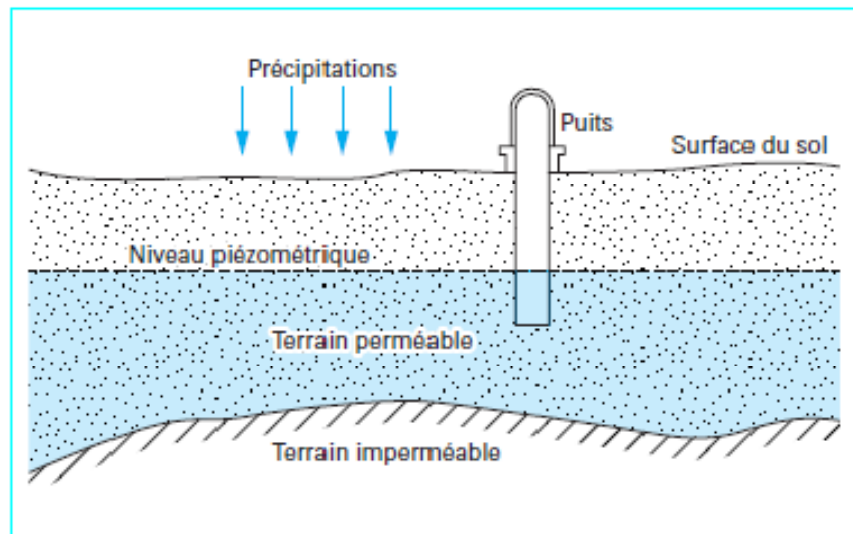
Les plaines alluvionnaires sont souvent formées de matériaux détritiques, c'est-à-dire de débris, très poreux et gorgés d'eau (figure I.7). Il y a là une réserve importante à exploiter et qui est presque toujours entretenue par le débit des rivières ainsi que par les précipitations et éventuellement la nappe des coteaux. Au voisinage de la mer, la nappe peut recevoir de l'eau salée.



*Figure I.7 : Nappe alluviale*

**(iv) Nappe phréatique**

Lorsque le fond imperméable est pratiquement horizontal et peu profond, il existe une nappe dite phréatique dans laquelle on peut creuser des puits (figure I.8).



*Figure I.8 : Nappe phréatique*

Le niveau piézométrique de la nappe phréatique a toujours tendance à suivre régulièrement les variations de la pluviosité. En période de sécheresse, les puits se tarissent.

**(c) Propriétés physiques et chimiques**

Les eaux souterraines ont des propriétés étroitement liées à leur origine géologique, c'est-à-dire déterminées par la nature et structure des terrains. À tout instant, l'eau est au contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule : il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau.

Ainsi, les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique, sont acides et peu minéralisées. Par opposition, les eaux circulant dans les sols calcaires auront une forte minéralisation avec une composition bicarbonatée calcique.

L'**eau des nappes captives** est une eau stagnante qui, de par son long contact avec les roches, est souvent très minéralisée avec la présence de fer et manganèse.

L'**eau des nappes alluviales** constituées de matières détritiques n'ayant pas terminées leur évolution géologique, contient très souvent des composés soufrés leur conférant saveur, odeur et goût très désagréables.

Parmi les caractéristiques générales des eaux souterraines, il faut retenir une très faible turbidité, une température et une composition chimique sensiblement constante et l'absence presque générale d'oxygène dissous.

Elles sont très souvent, mais pas toujours, d'une très grande pureté bactériologique ; c'est le cas lorsque l'eau s'infiltré dans des milieux à très fine granulométrie et de grand pouvoir filtrant (comme les grès triasiques), mais dans des milieux granitiques ou calcaires très fissurés et à grande vitesse de passage, l'eau ne sera pas épurée et peut même être dangereuse.

Les **nappes alluviales et phréatiques** sont vulnérables à la pollution domestique, industrielle et agricole ce qui peut expliquer la présence souvent à l'état de traces de micropolluants minéraux et organiques et de produits azotés à l'état ammoniacal ( $NH_4^+$ ) et de nitrates ( $NO_3^-$ ).

Il est à noter que lorsqu'une nappe a été polluée, il est très difficile de récupérer sa pureté originelle : les polluants sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également fixés et absorbés sur les roches et les minéraux du sous-sol.

### I.3. POLLUTION DES EAUX [2]

La pollution des eaux superficielles est très perceptible, attire de suite l'attention sur les dangers et les mesures à prendre pour la combattre.

Par contre la pollution des eaux souterraines est moins apparente, de telle sorte que la tendance générale est de la négliger. Mais elle n'en est pas moins dangereuse, car elle atteint les ressources les plus précieuses par leur qualité et la nature de leurs réserves.

En faisant disparaître les polluants dans le sol, on pense que l'on s'en débarrasse définitivement, ce qui est bien pratique, en conscience légère. En réalité on les cache tout simplement, et l'on pollue les nappes d'eau souterraine.

Or les eaux souterraines constituent une réserve immense dont on ne pourra pas se passer. C'est de l'eau pure, normalement protégée par les terrains qui la recouvrent, et par filtration au sein de l'aquifère. Lorsque 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. Par contre la contamination est beaucoup plus longue à disparaître en raison de la lenteur de la circulation de l'eau souterraine. Dans le cas de terrains karstiques les caractères de la pollution peuvent être semblables à ceux des eaux superficielles.

Si cette eau qui se répartit sur de grandes étendues où elle est souvent accessible et par conséquent utilisable à peu de frais, constitue dans l'ensemble une réserve considérable, elle n'en est pas pour autant inépuisable. La preuve c'est qu'en de nombreuses régions les ressources en eau souterraine deviennent insuffisantes, en particulier dans les zones à grande densité de peuplement, et à grande concentration industrielle; et c'est précisément là que la pollution des eaux est la plus intense. Car plus on consomme et retire d'eau souterraine et aussi d'eau superficielle, plus on pollue et les nappes et les cours d'eau.

La pénurie d'eau obligera à recharger les nappes par une sorte de recyclage. Ce recyclage ne peut s'opérer que conjointement à une épuration.

Tous ces problèmes d'introduction de polluants par les eaux d'infiltration et de réinfiltration d'eaux porteuses de polluants, allant jusqu'aux nappes d'eau souterraine ne peuvent se traiter que par un examen des conditions d'hydrologie souterraine et du comportement des polluants.

Il est ainsi nécessaire qu'un travail d'ensemble soit fait, pour tout ce qui concerne les mesures hydrauliques, chimiques, biologiques, physiques à entreprendre pour comprendre la pollution et lutter contre celle-ci.



#### **I.4. LA PENETRATION ET LES TRAJETS DE LA POLLUTION**

La pénétration et les trajets de la pollution dans les terrains jusqu'aux nappes d'eau souterraine; la nature et l'origine des-pollutions; et les mesures nécessaires pour l'examen de la qualité des eaux souterraines en rapport avec la pollution.

##### **I.4.1. L'entrée et le milieu de la pollution**

La pollution peut se faire par la surface des affleurements de l'aquifère, aussi bien dans une nappe captive que dans une nappe libre. Mais l'intensité de la pollution, le transport, la vitesse de propagation, la vitesse de destruction de cette pollution dépendent essentiellement de la nature de l'aquifère.

Dans les terrains à perméabilité d'interstices tels que les sables la pollution ne se transmet qu'à une très faible vitesse; la grandeur de la surface des particules solides permet une rétention importante, surtout s'il y a des particules argileuses.

Dans les terrains à perméabilité de fissures, (terrains cristallins et cristallophylliens), la vitesse n'est pas très rapide; la pollution le long de ces fissures est dirigée.

Dans les terrains karstiques, la pénétration est rapide souvent instantanée dans les diaclases ouvertes, dans les bétoires, les gouffres, les dépressions fermées. La vitesse de circulation est très grande et aucune filtration ne se produit.

Dans cette pollution par la surface des affleurements, deux cas peuvent se présenter.

Il peut y avoir une pollution tout à fait générale, c'est-à-dire sur toute l'étendue des affleurements des aquifères. Telle peut être par exemple une contamination par le tritium ou l'épandage d'engrais. Dans le cas des nappes libres cette contamination est totale, c'est-à-dire s'étendant à toute la nappe, tandis que dans les nappes captives, elle n'intéresse au premier chef que la zone amont d'infiltration et ne se propage que plus ou moins lentement au reste de la nappe.

Il peut y avoir une pollution locale, ne se produisant que par une faible surface. La pollution ne s'étendra qu'à une surface plus ou moins restreinte ou étendue suivant l'intensité de la pollution. Et cette pollution ira en décroissant à partir du centre de pollution. Ce sera par exemple, la pollution par une ferme, un puits perdu, une usine etc.

La pollution peut se faire aussi par pénétration d'eau de rivière polluée. Les remarques faites au sujet de l'influence de la nature du terrain, terrains à perméabilité d'interstices, de fissures, karstiques, restent les mêmes que précédemment. Mais les différences des effets sont accentuées par suite de la plus grande quantité d'eau en présence. Et puis dans un terrain à perméabilité d'interstices, c'est cette perméabilité qui est le facteur de contrôle, tandis que dans un terrain karstique, c'est le plus souvent le débit du cours d'eau superficielle.

La pénétration peut se faire naturellement par exemple dans le cas de rivière en charge par rapport à la nappe (cas de cônes de déjection, rivière de plaine exhausmée etc.), hausse du niveau de la rivière par barrage, dans le cas de rivière en crue.

A ce cas de rivière s'ajoutent les cas des canaux de navigation, des canaux d'irrigation, des lacs, des réservoirs sur rivière.

La pénétration peut être induite par un pompage dans l'aquifère.

La pollution peut avoir lieu par pénétration d'eau salée, eau de mer par exemple.

Là encore il faut faire intervenir les trois genres de perméabilité indiqués plus haut.

S'il y avait équilibre il n'y aurait guère de différence. Mais il n'en est pas de même lorsque l'eau douce est en mouvement.

Deux cas sont encore à considérer:

- (1) La pénétration est naturelle
- (2) La pénétration est induite par extraction de l'eau douce de la nappe.

#### **I.4.2. Les trajets**

Les trajets, l'intensité du polluant, la vitesse de propagation ont une influence capitale sur les caractères de la pollution.

Il y a lieu de considérer:

(a) La profondeur de l'entrée. La pollution peut entrer par la surface du terrain. La nature de cette surface joue un rôle capital. Le terrain peut avoir une couverture de terre végétale agissant comme purificateur par sa teneur en microorganismes, en colloïdes minéraux et organiques etc.

S'il n'y a pas de couverture de terre végétale, la contamination sera d'autant plus facile que l'on passe des terrains à perméabilité d'interstices aux terrains à perméabilité de fissures et de chenaux.

La pollution peut entrer à une certaine profondeur sous le sol. Cela revient un peu au cas précédent, mais aggravé, car il est plus facile de produire une charge de polluant (cas des puits perdus par exemple).

Un facteur important est la distance séparant la source de pollution de la surface de la nappe, car cette distance est à compter dans le cas d'épuration par filtration. Elle s'ajoute à la distance de filtration horizontale de la nappe. Cette distance peut être réduite à zéro, c'est-à-dire que le polluant arrive directement dans la nappe.

(b) La vitesse de propagation, car celle-ci entrera en ligne de compte dans le calcul de la décroissance de la pollution à partir du point de contamination. On aura donc à considérer la vitesse de filtration verticale dans la zone d'aération et la vitesse de propagation dans la nappe en tenant compte de la vitesse de diffusion.

(c) L'intensité et la durée de la pollution. Le rapport de débits entre polluant et pollué.

(d) L'amortissement du polluant, c'est-à-dire la diminution du polluant à partir du lieu de pollution. Diminution du polluant par rétention dans le terrain, et diminution par destruction, physique, chimique ou biologique.

(e) L'extension du polluant dans les eaux souterraines, en distances, en largeur, en profondeur.

## I.5. LES ORIGINES DES POLLUTIONS

L'évolution spectaculaire que connaît l'environnement urbain et industriel pose dans de nombreux pays le problème de l'eau.

Qui dit pollution, pense irrémédiablement industrie et éventuellement agriculture. Le raccourci est un peu facile toutefois. Il est inexact surtout. Nous sommes tous des pollueurs, chacun à sa mesure certes. Les ressources en eau sont exposées en réalité à plusieurs types de pollution.

➤ **L'industrie**, c'est vrai, rejette bon nombre de substances qui vont polluer nos rivières et nos nappes, parfois même d'une manière d'autant plus pernicieuse que l'on n'en connaît pas les effets à long terme. Les rejets industriels renferment des produits divers sous forme insoluble ou soluble d'origine minérale et/ou organique, à caractère plus ou moins biodégradable et parfois toxique même à très faible concentration.

Les pollutions chimiques et biologiques vont souvent de pair mais on peut mettre à part les usines atomiques.

Industries des produits pétroliers par exemple forages, raffineries, réservoirs, oléoductes, réservoirs souterrains, postes de pompes à essence etc.; déchets des Mines, par exemple de sels de sodium ou de potassium arrivant à saler dangereusement les nappes superficielles, terrils, exhaure etc. industries métalliques; industries chimiques; papeterie; sucrerie; distillerie; laiterie; teinturerie; lavage de laine etc.; usines atomiques à déchets liquides et déchets solides etc.

➤ L'**agriculture** utilise des engrais chimiques azotés et phosphorés, des produits phytosanitaires destinés à protéger les cultures et à faciliter la vie des agriculteurs. Ces produits parfois toxiques lorsqu'ils sont utilisés en excès vont contaminer en période de pluie, les eaux de surface par lessivage et ruissellement et les nappes par infiltration.

➤ La **pollution domestique** de nos eaux usées urbaines (mélange d'eaux vannes et d'eaux ménagères) est essentiellement constituée de matières organiques biodégradables certes, mais grandes consommatrices d'oxygène, de germes pathogènes (cause d'épidémies) et de produits chimiques (lessives détergentes riches en phosphates) à l'origine des phénomènes d'eutrophisation.

Par nos lavabos, nos éviers, nos salles de bains et nos WC passe chaque jour une pollution proportionnelle au nombre d'habitants.

➤ Il ne faut pas oublier par ailleurs, la **pollution générée par les eaux pluviales** en particulier en périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles) puis en ruisselant sur les toits et les chaussées des villes, de produits divers (huiles de vidange, carburants, métaux lourds, etc.).

En définitive, il faut considérer que si l'on veut éviter, sous l'effet des rejets polluants de dégrader gravement l'environnement, il est nécessaire de préserver le mieux possible notre patrimoine naturel, constitué par nos ressources en eau.

## **I.6. LES MESURES NECESSAIRES POUR L'EXAMEN DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES EN RAPPORT AVEC LA POLLUTION**

Il y a deux sortes de mesures à entreprendre: les mesures hydrauliques qui conditionnent la pénétration des polluants jusqu'aux nappes et l'entraînement de ceux-ci par ces nappes, et les mesures biologiques, chimiques et physiques concernant les polluants eux-mêmes.

Il n'est pas question ici de donner le détail de toutes ces mesures, mais seulement le cadre. Les mesures sont en effet essentiellement techniques. Comme elles sont assez diverses, il faudra faire un choix.

### I.6.1. Mesures hydrauliques

Dans le cadre des mesures hydrauliques, il sera nécessaire d'examiner les points suivants:

#### Modes d'entrée

La grandeur d'intensité et le temps de pénétration du polluant dépendent en premier lieu du mode d'entrée dans les terrains. L'entrée peut se faire:

- (1) Par la surface du sol. Mais il faut y considérer divers cas, essentiels pour calculer la grandeur et l'intensité de la pollution. Celle-ci peut entrer :
  - (a) Par une surface étendue. Si elle est répartie sur toute sa surface quoique l'intensité soit faible, la grandeur de la pollution pourra être très grande.
  - (b) Par une surface limitée non linéaire. La grandeur de la pollution ne sera importante que si l'intensité de celle-ci est aussi grande.
  - (c) Par une surface linéaire (par un canal, une rivière par exemple).
- (2) Par des puits ou des forages. C'est en somme une entrée ponctuelle de la pollution. Si l'entrée de la pollution est massive, la concentration du polluant dans la nappe pourra être importante, mais elle sera relativement circonscrite.
  - (a) Si le puits n'atteint pas la nappe, la pollution sera retardée par le cheminement à travers la zone de percolation et un amortissement pourra se produire.
  - (b) Si au contraire le puits atteint la nappe, la pollution sera directe et immédiate, sans amortissement.
- (3) Par entrée latérale dans la nappe: c'est le cas d'entrée d'eau douce polluée de rivière, d'eau salée de la mer, etc.

#### Cheminement de la pollution jusqu'à la nappe

Les mesures concernant ce cheminement de la pollution depuis la zone d'entrée jusqu'à la surface de la nappe sont de première importance, car elles permettent de calculer le temps que met la pollution pour aller de la zone d'entrée à la surface de la nappe. Ensuite elles permettent d'établir les bases nécessaires à l'estimation de la rétention du polluant et au besoin de la diminution de la pollution et de sa transformation.

- (1) Dans le cas de cheminement à partir de la surface du sol, un grand nombre de mesures sont à faire concernant:
  - (a) La constitution de la surface du sol.
  - (b) La constitution verticale des terrains jusqu'à la nappe c'est à dire:
    - (i) La lithologie (les sables fins sont filtrants, les argiles forment écrans etc.).
    - (ii) La porosité et la perméabilité de chaque couche.
    - (iii) Le pouvoir de rétention de chaque couche vis à vis du polluant.
    - (iv) La possibilité de colmatage.
    - (v) Le temps d'accès de la pollution jusqu'à la nappe.
  
- (2) Dans le cas de cheminement vertical à partir de puits, ce qui est semblable pour les canaux, il y a lieu de considérer et évaluer ou mesurer:
  - (a) La nature du puits ou du canal.
  - (b) La profondeur de l'entrée sous la surface du sol, par exemple dans le cas d'un forage la situation de la crépine, dans le cas d'un puits la situation du fond ou des parois filtrantes.
  - (c) La hauteur de la zone d'entrée, par exemple pour un forage la hauteur de la crépine.
  - (d) La constitution du terrain de la zone d'entrée ce qui doit permettre d'estimer le début de la pollution à l'entrée du terrain. On examinera notamment : la porosité, la perméabilité, le pouvoir de rétention, et le colmatage.
  - (e) La constitution du terrain jusqu'à la nappe on examinera les mêmes éléments que précédemment.
  
- (3) Dans le cas de cheminement latéral l'étude de la constitution de l'entrée est aussi nécessaire. Elle comprend les mesures concernant :
  - (a) La hauteur de la zone d'entrée. Le débit entrant sera d'autant plus grand que cette hauteur est importante, toutes autres choses égales.
  - (b) La porosité, la perméabilité.
  - (c) La présence ou l'absence d'un écran plus ou moins perméable ou imperméable.
  - (d) La possibilité du colmatage.

Débit du polluant et de la pollution

Connaissant les modes d'entrée, les caractères et propriétés des terrains à travers lesquels se transmet la pollution, il est nécessaire de procéder aux mesures relatives au débit du polluant lui-même d'abord débit entrant dans la nappe et ensuite débit et concentration dans la nappe elle-même.

(1) Débit du polluant:

- (a) Dans le cas de cheminement vertical à partir de la surface, il est nécessaire de connaître par  $m^2$  le débit du transporteur et le débit du polluant à travers la surface et la reprise par évapotranspiration du transporteur.
- (b) Dans le cas d'entrée par puits les débits par puits du transporteur et le débit du polluant par unité.
- (c) S'il s'agit de la pollution par canal, ces mêmes débits par unité de longueur.
- (d) Il est aussi nécessaire de connaître la charge du transporteur sur la zone d'infiltration.
- (e) Puis la rétention du polluant au cours du trajet.

(2) Pollution de la nappe: ce n'est qu'à l'aide de ces premiers éléments que l'on pourra évaluer la pollution de la nappe, car on pourra calculer:

- (a) Le débit du transporteur et du polluant arrivant jusqu'à toute la surface de la nappe, par intégration des données précédentes.
- (b) La concentration de la pollution dans cette nappe.

Cheminement de la pollution dans la nappe

- (1) Si la nappe ne possède aucun mouvement ou qu'une vitesse très faible, la pollution stagnera dans la nappe et son intensité ne fera que croître.
- (2) Si, au contraire, la nappe se déplace, la pollution elle-même se déplacera et un équilibre dynamique de la pollution s'établira. Mais en se déplaçant la pollution intéressera des zones plus ou moins étendues, contaminant des surfaces plus ou moins grandes. Il y aura donc lieu d'établir:

- (a) La direction de l'écoulement.
- (b) La largeur de la zone polluée.
- (c) La longueur de celle-ci.
- (d) Le déplacement du front de pollution c'est à dire sa vitesse, sa largeur.
- (e) L'amortissement de la pollution au cours de son déplacement.

### **I.6.2. Les mesures biologiques, chimiques et physiques**

Les mesures biologiques, chimiques et physiques à prendre sont extrêmement nombreuses et il n'est pas question d'en donner de détail ici, mais plutôt une vue d'ensemble de la question, dans laquelle il sera facile d'inscrire ultérieurement ces détails.

#### *L'étude de la pollution des zones de contamination à la nappe*

C'est le premier objet. Cela comporte les mesures et évaluations concernant:

- (1) La connaissance de la composition chimique et biologique du polluant.
- (2) Sa rétention dans la zone d'entrée.
- (3) Sa modification par la surface du sol par exemple.
- (4) L'étude des améliorations à apporter à la destruction de celle-ci à la surface du sol et dans le sol.
- (5) L'étude du colmatage, et du décolmatage.
- (6) Les modifications dans la zone d'infiltration, c'est à dire entre la zone d'entrée et la nappe.
- (7) L'étude des facteurs de ces modifications.

#### *L'étude de la pollution dans la nappe*

Elle même est plus facile à exécuter pourvu que l'on ait des puits ou des forages pour permettre des prises d'échantillons. Ces prises d'échantillons sont à faire le long du trajet de la langue de pollution et transversalement.



Les mesures

Comme on l'a dit, les mesures à faire sont extrêmement nombreuses:

- (1) Les analyses- chimiques; bactériologiques; biologiques, etc.
- (2) Les facteurs, la température; le degré de sécheresse ou d'humidité des terrains; les pouvoirs de fixation et d'échanges; les modifications du milieu chimique; les modifications du milieu bactériologique; le potentiel d'oxydoréduction, etc.

CHAPITRE II

LA CHIMIE DE  
L'EAU DANS LES  
NAPPES

### II.1. LES NOUVELLES DISSOLUTIONS [3]

Les nouvelles dissolutions sont à inscrire dans les phénomènes modificateurs. C'est ainsi qu'une augmentation de la teneur en Cl et Na de l'eau permettra une dissolution plus grande de  $\text{SO}_4\text{Ca}$  ou de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . C'est là un phénomène très important que l'on constate tout particulièrement dans les eaux de gisement de pétrole. Si nous nous reportent au tableau de la solubilité de gypse, nous voyons qu'une eau à 14 g de NaCl dissout sensiblement deux fois plus de gypse qu'une eau pure, une eau à NaCl/N, 58,5 g, soit trois fois plus. Le maximum de solubilité de gypse, un peu plus de 7g de  $\text{SO}_4\text{Ca}$ , se produit avec une eau à NaCl/2N.

### II.2. LES PHENOMENES LIMITANTS

Les phénomènes limitants la teneur des sels intéressent les corps dans la solubilité est la plus faible, c'est à-dire :  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ , ...etc., mais dans certains cas où les concentrations peuvent atteindre de hautes valeurs, en particulier dans les eaux de gisement du pétrole, des sels facilement solubles, tel NaCl, peuvent en être affectés.

La concentration générale de l'eau opérant, des sels le plus souvent déjà à l'état de saturation, comme le  $\text{CaCO}_3$ , garderont les mêmes concentrations, tandis que pour les autres, cette concentration s'accroîtra. Le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , dont la solubilité quoique sensiblement plus élevé reste malgré tout relativement faible, sera ensuite atteint. Des précipitations de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ont été d'ailleurs constatées en maints endroits dans les eaux de gisement de pétrole.

Lorsque la concentration est poussée à un degré élevé, vraisemblablement par évaporation par les gaz de gisements de pétrole, du NaCl peut même précipiter.

Des variations de la tension de  $\text{CO}_2$ , par une diminution soit de la proportion du  $\text{CO}_2$ , soit de la pression des gaz, amèneront une précipitation de  $\text{CaCO}_3$ . Si, au contraire, l'eau est déjà saturé en  $\text{CaCO}_3$ , une augmentation de la tension du  $\text{CO}_2$ , permettent une nouvelle dissolution de  $\text{CaCO}_3$ , sera capable par augmentation de nombre des ions Ca, de précipité de  $\text{CaSO}_4$ .

#### ➤ Température

La température peut également agir. Un abaissement de température diminuera la solubilité du  $\text{CaSO}_4$  alors qu'il augmentera celle du  $\text{CaCO}_3$  et inversement.

➤ Mélange

Les mélanges d'eau provenant de nappes différentes pourront amener des précipitations. Une eau à forte teneur en Ca pourra précipiter le  $\text{CaCO}_3$  ou le  $\text{CaSO}_4$  d'une autre eau. Une eau à forte teneur en  $\text{SO}_4$  pourra en se mélangeant précipiter le  $\text{CaSO}_4$ .

➤ Echanges de bases

Les échanges de bases sont aussi très fréquemment, particulièrement agissants. Lorsqu'ils apportent du Ca en échange de Na, l'on peut fréquemment observer une diminution de  $\text{HCO}_3^-$ , et aussi parfois de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Il y a là un phénomène tout à fait remarquable. Il est à remarquer que la précipitation de NaCl, par apport de Na par échange de bases, n'est pas impossible.

### II.3. LES CONDITIONS PHYSIQUES ET GEOLOGIQUES DE LA MISE EN SOLUTION DES ATTAQUES CHIMIQUES ET DES REACTIONS

Un certain nombre de conditions physico-géologiques président aux mises en solution, des attaques chimiques et diverses réactions qui se passent dans les nappes d'eau souterraines.

La température et, par conséquent, la profondeur de la couche aquifère ne sont pas sans influence. Elle activera les dissolutions du  $\text{CaSO}_4$ , du NaCl et de tous les autres sels à l'exception du  $\text{CaCO}_3$  et du  $(\text{MgCa}) \text{CO}_3$  moins solubles aux températures plus élevées. Et elle favorisera également les attaques chimiques qui intéressent en particulier les silicates.

Les augmentations de pressions, comme il peut y en avoir pour les gaz des gisements de pétrole et, par là, l'accroissement de la tension de  $\text{CO}_2$ , permettront des attaques plus intenses des carbonates ou même des silicates.

La grandeur des surfaces de contact entre l'eau et les roches est aussi de première importance. Ainsi, plus les couches aquifères meubles ont un grain fin, de même plus les couches aquifères consolidées ont de nombreuses diaclases ou chenaux, plus l'eau se concentrera rapidement en éléments chimiques. C'est ce qui explique la haute teneur, en générale des eaux des argiles et des sables argileux et la faible teneur des eaux des roches simplement fissurées. La grandeur des surfaces de contact est naturellement proportionnelle à

la longueur du trajet des eaux souterraines. C'est pour quoi l'on constate généralement une augmentation de la concentration de l'eau de l'amont à l'aval de la nappe.

La teneur en éléments de l'eau sera évidemment fonction de la concentration en sels se trouvant dans la roche, de la manière dont ils y sont répartis. Lorsque la roche est entièrement formée de sels solubles,  $\text{CaCO}_3$ ,  $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ , ou de minéraux attaquables, les conditions de mises en solution d'un élément donné seront d'autant plus difficiles que la dispersion sera grande ou que leur proportion sera plus faible. Les phénomènes de diffusion joueront un rôle prépondérant si le degré de porosité est suffisamment grand. Mais dans d'autres cas, comme par exemple celui de certains calcaires compacts, les substances solubles ou attaquables ne peuvent passer en solution qu'après dissolution de la matière calcaire qui les emprisonne.

Il y a lieu enfin de remarquer que la vitesse de dissolution dans l'eau sera d'autant plus grande que l'eau est moins chargée en sels. En effet, selon la loi de Nernst, « la vitesse de dissolution d'un corps solide est proportionnelle au déficit de saturation ».

Ainsi, le temps de contact entre en jeu. Il est lui aussi un facteur primordial dans la concentration, d'importance égale, sinon supérieure à la grandeur des surfaces de contact. C'est aussi lui qui permet un accroissement de la concentration de l'amont à l'aval des nappes. Et c'est le temps qui confère aux eaux stagnantes leur haute teneur en sels, qui souvent les fait confondre avec les eaux connues.

Au bout d'un certain temps, on peut admettre que les eaux sont en équilibre avec les terrains qui les renferment.

Les études précédentes concernant les mise en solution, les phénomènes limitants et les conditions physico-géologiques vont nous permettre de comprendre quelle peut être l'évolution de la composition de l'eau dans une même nappe, et quelles peuvent être les différences de composition de l'eau des différentes nappes.

#### II.4. REACTION CHIMIQUES MAJEURES DANS LES NAPPES [4]

L'eau des nappes provient des sols, sa composition sera donc proche de celles des solutions de sol. Les sols étant développés sur le même type de dépôt que les aquifères sous-jacents, la chimie des eaux évoluera peu du sol à l'aquifère. Les modifications majeures de la composition chimique des eaux proviennent de l'isolement progressif des solutions vis-à-vis de l'atmosphère. L'oxygène est présent dans l'air du sol, puis, lors de leur infiltration vers la nappe, les eaux ne sont plus au contact de l'air et il va donc se produire une transition progressive d'un milieu aérobie vers un milieu anaérobie. Cette évolution donne lieu à une séquence de réactions dites d'oxydoréduction ou redox.

##### II.4.1. Les échanges avec le sol

La majeure partie de l'eau présente dans les aquifères a transité par les sols, bien que des transferts directement sur la roche, par les berges des rivières ou depuis d'autres aquifères soient possibles. Le mouvement de l'eau dans les sols est lent, en générale de l'ordre du mètre/an, et advient principalement pendant la plus humide de l'année. Ce passage lent dans les sols induit un équilibre avec la phase gazeuse et les minéraux des sols. Proche de la surface des sols, l'activité biologique génère du  $\text{CO}_2$  et la pression partielle de ce gaz est nettement supérieure à celle qu'elle a dans l'atmosphère. Ainsi les eaux ayant transité dans les sols et pénétrant dans les aquifères sont toujours en équilibre avec une  $p\text{CO}_2$  plus grand que dans l'atmosphère.

En ce qui concerne les minéraux, les eaux seront souvent en équilibre avec des phases silicatées, qui peuvent être de nature différentes selon les sols (quartz, feldspaths, argiles). Par ailleurs la calcite est souvent présente, soit au sein des sols eux-mêmes, soit dans l'horizon C, c'est-à-dire dans l'horizon d'altération de la roche mère. C'est pourquoi l'équilibre avec la calcite est souvent réalisé très près de la surface ; il peut néanmoins être modifié selon les conditions chimiques au sein des aquifères. Les minéraux très solubles sont en général absents des sols et les équilibres avec ceux-ci seront en général réalisés dans les horizons profonds.

##### II.4.2. Réaction d'oxydoréduction

Afin de décrire les réactions dans les aquifères de surface il convient d'étudier dans un premier temps les réactions d'oxydoréduction. Nous verrons que ce sont ces réactions redox vont modifier de nombreux paramètres de la qualité des eaux, comme la teneur en oxygène,

en fer, en hydrogène sulfuré. Par ailleurs, en modifiant ces paramètres, ces réactions vont influencer sur le devenir des polluants métalliques dans les eaux, mais aussi conditionner la dégradation de certaines substances organiques.

Les réactions redox sont originales, en effet, pour qu'elles se produisent, la présence simultanée de deux réactifs est nécessaire car les électrons ne peuvent se déplacer seuls dans l'eau. A l'inverse, les composés acide-base peuvent directement réagir avec l'eau car un proton peut se déplacer dans l'eau afin de transférer de l'acidité. L'absence d'électrons dissous implique aussi une détermination très difficile du potentiel redox d'une solution. Dans le milieu naturel, ces réactions sont souvent presque totales, une espèce étant très fortement majoritaire par rapport à l'autre espèce du couple. Par ailleurs dans la plupart des cas, ces réactions ont des bactéries qui sont des catalyseurs efficaces mais complexes.

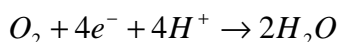
#### II.4.3. Séquence redox

Le processus le plus important dans les réactions redox est la dégradation de matière organique, avec changement d'état d'oxydoréduction du carbone. Lors de la photosynthèse, les végétaux vont produire de l'oxygène en utilisant le CO<sub>2</sub> atmosphérique. A l'inverse, dans les eaux contenant de la matière organique, les bactéries et autres micro-organismes vont utiliser cette matière organique pour leur respiration et ainsi consommer l'oxygène et produire du CO<sub>2</sub>. Lorsque l'oxygène du milieu aura été entièrement consommé les bactéries utiliseront d'autres oxydants (accepteurs d'e<sup>-</sup>).

La présence de métaux peut aussi être à l'origine de réactions redox lorsque ceux-ci sont mis en contact avec une eau de composition nouvelle, c'est le cas par exemple des mines acides ou des sites contaminés par les métaux. Néanmoins dans la majorité des cas, et toujours lorsque les métaux sont à l'état de traces, c'est le devenir des métaux qui va être influencé par l'état redox du milieu et donc principalement par le comportement de la matière organique.

#### II.4.4. Oxygène

L'oxygène est l'oxydant le plus fort présent dans les eaux naturelles : base de la vie, il va être utilisé par de nombreuses bactéries. La seule réaction qui se produise dans les eaux naturelles est :



L'oxygène est présent dans les eaux de pluies mais sa concentration est relativement faible, sa teneur est proche de 10mg/l à 15°C, de 8 à 25°C et 12.5 mg/l à 5°C. Comme pour tous les gaz la concentration en solution diminue avec l'augmentation de la température. En effet un gaz se vaporise plus facilement lorsque la température est élevée. Cette teneur dans les eaux des aquifères superficiels est déterminée par la loi de Henry qui décrit l'équilibre de la solution avec une atmosphère contenant à-peu-près 20% d'O<sub>2</sub>.

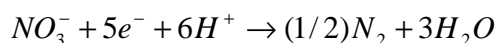
L'oxygène est amené dans les aquifères par les précipitations qui s'infiltrent dans le sol. La teneur en oxygène des eaux souterraines dépend donc d'abord de la température d'infiltration et ensuite de la présence de matière biodégradable dans les sols et l'aquifère lui-même. En effet, en présence de matière organique, l'oxygène sera consommé en premier et va donc disparaître rapidement. Il est possible d'estimer la quantité de carbone(C) consommée en fonction de l'O<sub>2</sub> présent en se basant sur la stœchiométrie de la réaction. Les concentrations d'O<sub>2</sub> étant de l'ordre de 0.2 à 0.3 mmol/l (pour 6.4 à 9.6 mg/l), ce qui correspond à 0,8 à 1,2 mmol/l d'e<sup>-</sup> échangés (4 mol d'e<sup>-</sup> par mol d'O<sub>2</sub>) permettent de dégrader à peu près 0.25 mmol ou 3 mg/l de carbone organique. En effet, la composition moyenne de la matière organique peut être assimilée à CH<sub>2</sub>O qui, en se transformant en CO<sub>2</sub>, libère 4 e<sup>-</sup> par molécule. Il apparaît ainsi que lors d'une contamination importante, l'oxygène sera consommé rapidement. Une mesure des teneurs en O<sub>2</sub> peut donc servir de premier critère pour estimer s'il peut y avoir eu contamination d'une nappe. Dans les nappes profondes, en raison des temps de séjour, l'oxygène est rarement présent.

#### II.4.5. Azote

L'azote est présent sous de nombreuses formes minérales (N<sup>+V</sup>O<sub>3</sub><sup>-</sup>, N<sup>+IV</sup>O<sub>2</sub>, N<sup>+III</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sup>0</sup><sub>2</sub>, N<sup>-III</sup>H<sub>4</sub><sup>+</sup>) et organiques (degrés d'oxydation variables). Les apports depuis des sources externes au sol sont principalement sous forme de nitrates (N<sup>+V</sup>O<sub>3</sub><sup>-</sup>) et d'ammonium (N<sup>-III</sup>H<sub>4</sub><sup>+</sup>) dans les engrais (et éventuellement les pluies) et sous forme d'azote organique dans les amendements organiques. Le cycle de l'azote est complexe, il peut y avoir production ou consommation de nitrates dans les sols selon la période de l'année et la composition de la matière organique du sol. Dans la majorité des cas l'azote qui transite dans les aquifères est sous forme de nitrates. Sur certains sites pollués, la présence de produits organiques peut entraîner, en milieu fortement réducteur, la libération d'ammonium.



La réaction majeure dans les aquifères, dite de dénitrification, est :



Les réactions relatives à l'azote sont en quasi-totalité effectuées par les bactéries lorsque le pH est proche de la neutralité. Les teneurs en nitrates des eaux d'infiltrations sont très variables : une valeur de 25 à 50 mg/L est courante, ce qui correspond à 0.4 à 0.8 mmol d'e<sup>-</sup>. L'oxydation de matière organique par réduction des nitrates peut conduire à la dégradation de 5 à 10 mg/L de carbone organique. Nous voyons donc que les nitrates peuvent jouer un rôle plus important que l'oxygène dans la dégradation des substances organiques ; mais ceci se produit uniquement si le pH est proche de la neutralité et que les bactéries dénitrifiantes sont présentes.

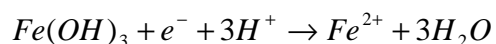
#### II.4.6. Fer

Le fer, quant à lui, est présent dans presque tous les sols, sous forme principalement solide. Deux états d'oxydation sont présents :

- Fe<sup>II</sup> : Fe<sup>2+</sup> dissous, ou sous forme solide : carbonates (sidérite : FeCO<sub>3</sub>) ou sulfures (FeS ou pyrite : FeS<sub>2</sub>).
- Fe<sup>III</sup> : nombreuses formes, dissous uniquement à pH très bas. A pH plus élevé, il est présent sous forme d'oxydes (hématite : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) d'hydroxydes (goethite FeOOH, fer amorphe Fe(OH)<sub>3</sub>) en général précipité sur les grains ou sous forme colloïdale.

La présence de fer oxydé et réduit dans les sédiments est signalée par des couleurs bariolées allant de l'ocre-rouge au gris-vert. Une concentration de 0.1% de fer solide est assez courante dans un sédiment, ce qui correspond à-peu-près 9 g.Fe/l dans un milieu poreux. Néanmoins la concentration dissoute est souvent inférieure à 1 mg/l. Ainsi la concentration dans l'eau correspond à une dissolution d'une infime partie du fer présent sous forme solide, en raison d'une dissolution lente d'oxydes et hydroxydes de fer peu solubles.

Réaction majeure :



Dans les eaux non contaminées, le fer dissous est présent principalement dans les tourbières. Les tourbières sont des sols presque entièrement organiques qui contiennent très peu d'éléments minéraux. Ces sols sont fortement anoxiques. Ainsi le fer est présent sous forme de  $Fe^{2+}$  dissous. Lorsque ces sols sont mis en culture, ils sont généralement drainés afin de limiter la saturation en eau. Dans les drains, l'eau est au contact de l'atmosphère et donc de l'oxygène. Le fer va donc peu à peu s'oxyder le long du parcours de l'eau. Cette oxydation va conduire à du fer particulaire, souvent sous forme d'hydroxyde amorphe. Dans le cas des tourbières, la présence de matière organique en concentration élevée conduit aussi à une complexation de quantité non négligeable de  $Fe^{II}$  et de  $Fe^{III}$  avec la matière organique.

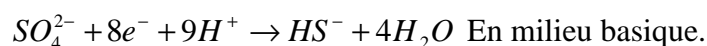
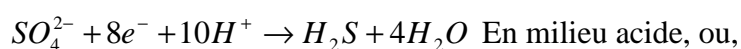
**Tableau II.1 :** Evolution de la chimie des eaux et du pourcentage de fer particulaire dans des eaux de drainage de tourbières évoluées.

	pH	O <sub>2</sub> %	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (µg/l)	Fe particulaire %
Tourbe	4,2	0	5,2	0,08	170	7
Drain	6,4	48	31	0,4	902	22
rivière	7,6	86	9,6	4,7	428	70

#### II.4.1. Soufre

Le soufre est d'origine marine dans les précipitations, et depuis le début de l'ère industrielle il est aussi présent sous forme de  $SO_2$  dans l'atmosphère. Sous forme solide le minéral le plus courant est la pyrite ( $FeS_2$ ) que l'on trouve notamment dans les granites ou dans les sédiments réduits (souvent noir). Il existe de nombreuses autres formes du soufre ( $S^0$ ,  $S_2O_3...$ ) qui sont la plupart du temps instables dans les eaux naturelles.

Le soufre est présent sous forme de sulfates dans de nombreux milieux, à des concentrations de plusieurs dizaines de milligrammes/l. sa réduction est effectuée par des bactéries sulfatoréductrices assez courantes. La réaction s'écrit :



Les sulfures, à l'odeur caractéristique « œuf pourri », sont présent dans de nombreux milieux réducteurs, tels que les marais ou les sols hydromorphes. A pH acide les sulfures seront sous forme d'acide sulfureux  $H_2S$  et à pH basique sous forme de  $HS^-$ . Par ailleurs les sulfures métalliques ( $ZnS$ ,  $FeS$ ,  $PbS...$ ) précipitent à des concentrations très faibles, ce qui limite la concentration de sulfures dans les eaux.

#### II.4.2. Carbone

Le carbone est présent à divers degrés d'oxydation dont les principaux sont  $+IV(CO_2)$ ,  $-IV(CH_4)$ , et entre  $+I$  et  $-I$  dans les molécules organiques.

Les bactéries utilisent les nombreuses formes organiques du carbone, à la fois pour renouveler leur propres constituants, mais aussi comme source d'énergie. Lorsque les bactéries utilisent le carbone pour former leurs propres protéines ce carbone passe d'une forme organique; dans la matière organique; à une autre forme organique, au sein des micro-organismes. Il y a donc rarement une modification d'état redox et, par conséquent, peu de modification de la chimie de l'eau.

#### II.4.3. Hydrogène

Réaction majeure :



L'hydrogène est le réducteur le plus fort pouvant exister dans l'eau. Il est néanmoins présent à des concentrations très faibles (0-20 nano mol/l) c'est pourquoi il n'a été possible de le quantifier que récemment. Il est produit principalement lors des étapes intermédiaires de la fermentation.

Etant donné son fort pouvoir réducteur, cette molécules est très réactive et sa durée de vie est de l'ordre de quelques minutes dans les aquifères. La teneur en  $H_2$  mesurée est le résultat d'un équilibre rapide entre production (par fermentation) et consommation (par les accepteurs d'électrons). En raison de cette réactivité il semble que la mesure des teneurs en hydrogène puisse donner une indication précise de l'état redox d'un système au moment de la mesure. Cette mesure ne s'applique qu'aux milieux réducteurs.

**Tableau II.2 :** Relation entre teneur en  $H_2$  et conditions redox.

Teneur en $H_2$	5-15 nM	1-4 nM	0,1-0,8 nM
Conditions redox	Méthanogenèse	sulfatoréduction	Réduction du fer

La teneur en  $H_2$  dans l'eau diminue nettement en présence d'accepteurs d'électrons ayant un  $E^0_H$  élevé. Ceux-ci réagissent rapidement avec l'hydrogène conduisant à une consommation rapide de ce dernier.

## II.5. MISE EN SOLUTION DU FER

### II.5.1. Introduction

Le comportement du fer dans les eaux varie selon la nature et les compositions de ces eaux. Et dans cette étude, nous allons expliquer brièvement certains paramètres qui peuvent influencer sur le comportement et les réactions du fer dans les eaux souterraines, en déterminant les domaines et les conditions de précipitation.

### II.5.2. les caractéristiques du fer dans les eaux souterraines [4]

Dans les eaux souterraines, le fer peut être à l'état d'ions ferriques  $Fe^{+++}$ , ferreux  $Fe^{++}$  et  $FeOH^{++}$ . Mais ce fer se trouve être en relation avec les ions  $CO_3^-$ ,  $OH^-$  et  $S^{--}$ , en raison des phases solides  $FeCO_3$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$  et  $FeS$ . D'un autre côté, il y a lieu de tenir compte des potentiels d'oxydo-réductions qui règlent les rapports entre  $Fe^{++}$  et  $Fe^{+++}$ , entre  $H_2$  et  $H^+$ , entre  $S^{--}$  et  $SO_4$ , et entre  $O_2$  et  $H^+$ . Nous avons donc à considérer les relations suivantes :

$$[Fe^{++}][OH^-]^2 = S_2 = 1,8 \cdot 10^{-15} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (1)$$

$$[Fe^{+++}][OH^-]^3 = S_3 = 6 \cdot 10^{-38} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (2)$$

$$[Fe^{++}][CO_3^-] = S_{Fe} = 2,11 \cdot 10^{-11} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (3)$$

$$[Fe^{++}][S^{--}] = S_s = 4 \cdot 10^{-19} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (4)$$

$$[H^+][OH^-] = K_{H_2O} = 1,008 \cdot 10^{-14} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} = K_1' = 4,16 \cdot 10^{-7} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} = K_2' = 4,84 \cdot 10^{-11} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{[FeOH^{2+}][H^+]}{[Fe^{3+}]} = K_2' = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (8)$$

$$Eh = 1,229 + 0,0147 \log O_2 - 0,059 \text{ pH à } 25^\circ \dots\dots\dots (9)$$

$$Eh = 0,771 + 0,059 \log \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]} \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (10)$$

$$Eh = 0,14 + 0,0075 \log \frac{[SO_4^{2-}][H^+]^8}{[S^{2-}]} \dots\dots\dots (11)$$

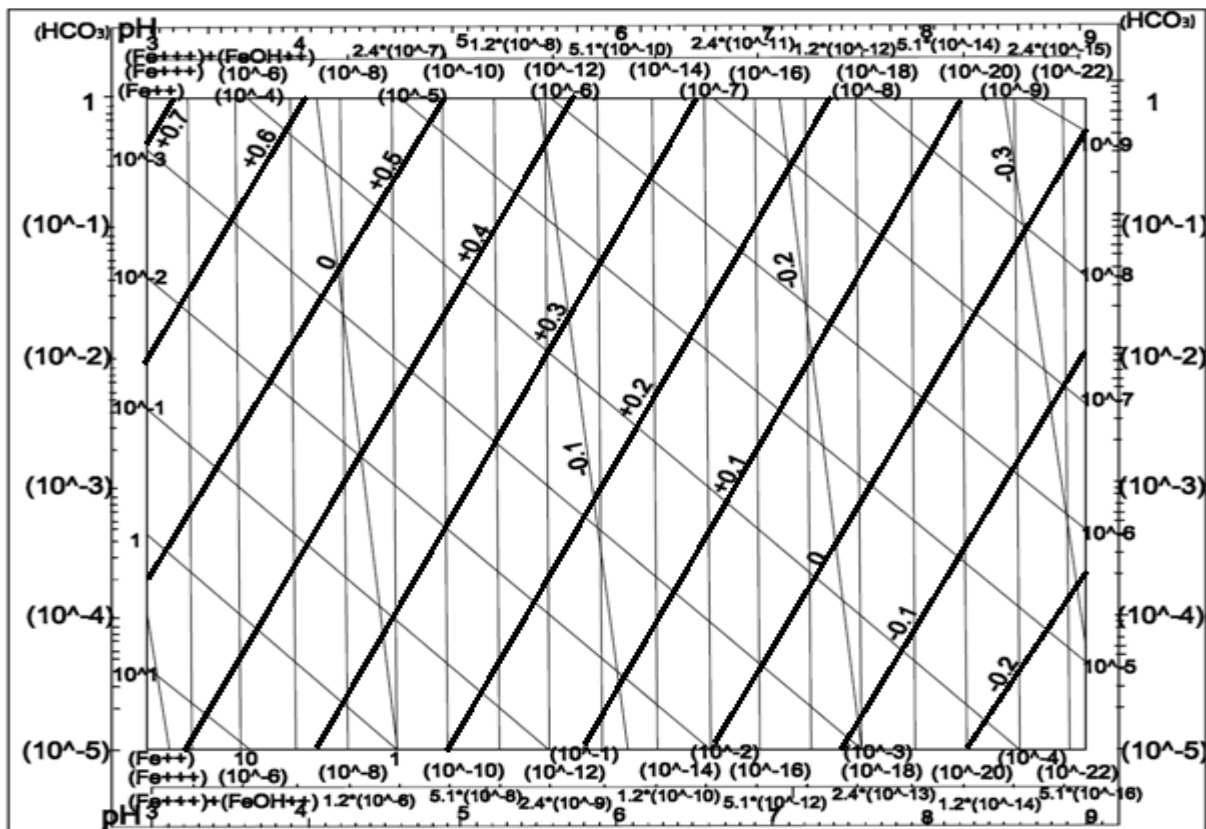


Figure II.1 : Diagramme  $[HCO_3^-]$  – pH des champs de précipitation de  $Fe(OH)_3$ ,  $FeCO_3$  et de  $FeS$ , et teneur maxima en  $[Fe^{2+}]$ ,  $[Fe^{3+}]$  et  $[FeOH^{2+}]$  dans chacun de ces champs

Limite des champs de précipitation pour les différentes valeurs d'Eh, en fonction du pH et de  $\text{HCO}_3$ . Obliques NE-SW, limites des champs de précipitations de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et de  $\text{FeCO}_3$ . Obliques épaisses de direction NW-SE, limites des champs de précipitation de  $\text{FeCO}_3$  et de  $\text{FeS}$ . Les potentiels Eh correspondants sont portés sur les obliques.

Concentrations

Les concentrations maxima en  $[\text{Fe}^{++}]$  sont données dans le champ de précipitation de  $\text{FeCO}_3$  par les obliques fines NW-SE ; dans le champ de précipitation de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et dans le champ de précipitation de  $\text{FeS}$ , par les verticales. Les valeurs sont à lire le long de l'échelle horizontale  $[\text{Fe}^{++}]$ . Les concentrations maxima en  $[\text{Fe}^{+++}]$  sont données de la même manière ; mais les valeurs sont à lire sur l'échelle horizontale  $[\text{Fe}^{+++}]$ .

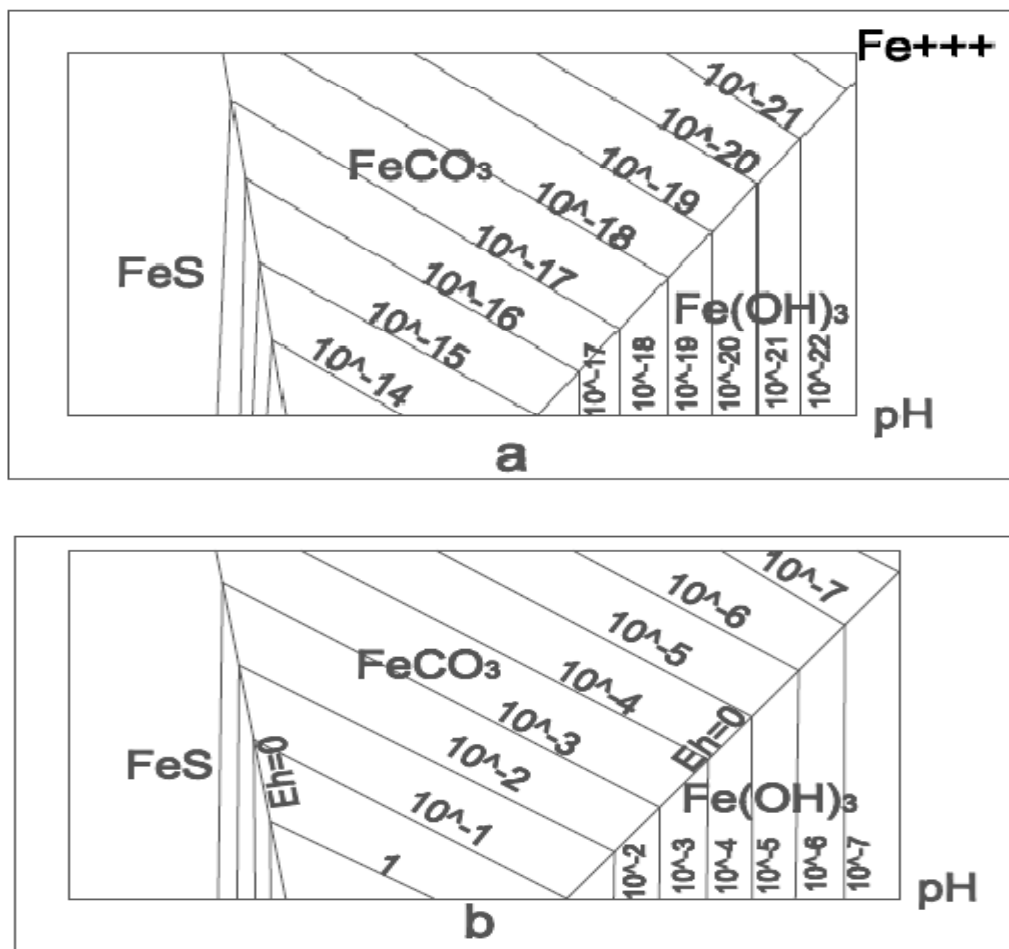


Figure II.2 : a, exemple de teneur en  $\langle \text{Fe}^{++} \rangle$ , avec  $Eh = 0$ ;

b, exemple de teneur en  $\langle \text{Fe}^{+++} \rangle$ , avec  $Eh = 0$

### II.5.3. Champs de stabilité

Nous sommes ainsi amenés à délimiter les champs de stabilité des trois phases solides  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ,  $\text{FeS}$ . Nous n'avons pas à nous occuper de la phase solide  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  qui, dans les conditions des eaux souterraines, ne peut avoir lieu.

La limite entre les phases  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et  $\text{FeCO}_3$  est donnée par la mise en commun des activités  $\text{Fe}^{++}$  et  $\text{Fe}^{+++}$  :

$$[\text{Fe}^{+++}][\text{OH}^-]^3 = S_3,$$

Avec:

$$[\text{Fe}^{++}][\text{CO}_3^{--}] = S_{\text{Fe}},$$

$$Eh = E_0 + 0,059 \log \frac{[\text{Fe}^{+++}]}{[\text{Fe}^{++}]}.$$

Soit :

$$Eh_a = 1,074 + 0,059 \log [\text{HCO}_3^-] - 0,118 \text{ pH} \quad \text{à } 25^\circ \dots \dots \dots (12)$$

En fonction d' $\text{O}_2$  :

$$\text{Log } \text{O}_2 = -10,54 + 4,01 \log [\text{HCO}_3^-] - 4,01 \text{ pH} \quad \text{à } 25^\circ \dots \dots \dots (13)$$

En introduisant l'équation (9) dans l'équation (12).

Dès lors, on a précipitation d'hydroxyde ferrique lorsque le Eh de l'eau est plus grand que  $Eh_a$ , ou que  $\log \text{O}_2$  de l'eau est plus grand que  $\log \text{O}_{2a}$ . Et l'on a précipitation de carbonate de fer dans le cas inverse.

La limite entre les phases  $\text{FeCO}_3$  et  $\text{FeS}$  est donnée par la mise en commun des activités  $\text{Fe}^{++}$  de :

$$[\text{Fe}^{++}][\text{CO}_3^{--}] = S_{\text{Fe}},$$

$$[\text{Fe}^{++}][\text{S}^-] = S_s,$$

Avec :

$$Eh = 0,14 + 0,0075 \log \frac{[SO_4^{--}][H^+]^8}{[S^{--}]}$$

Ce qui nous conduit à la relation :

$$Eh_b = 0,275 + 0,0075 \log [SO_4^{--}] - 0,0075 \log [HCO_3^-] - 0,0675 \text{ pH} \dots\dots\dots (14)$$

Ou:

$$\text{Log } O_{2b} = -64,9 + 0,510 \log [SO_4^{--}] - 0,510 \log [HCO_3^-] - 0,578 \text{ pH} \dots\dots\dots (15)$$

En introduisant l'équation (9) dans l'équation (14).

Dés lors, on a précipitation de  $FeCO_3$  lorsque le  $Eh_b$  ou que  $\log O_2$  de l'eau est plus grand que  $\log O_{2b}$ . Et il y a précipitation de  $FeS$  dans le cas contraire.

Mais il peut être aussi nécessaire d'examiner la limite des phases solides  $Fe(OH)_3$  et  $FeS$  qui peut exister dans certains cas. Elle est donnée par la mise en commun des activités  $Fe^{+++}$  et  $Fe^{++}$  des deux champs de stabilité :

$$[Fe^{+++}][OH^-]^3 = S_3,$$

$$[Fe^{++}][S^{--}] = S_s,$$

Avec

$$Eh = 0,14 + 0,0075 \log \frac{[SO_4^{--}][H^+]^8}{[S^{--}]},$$

$$Eh = 0,771 + 0,059 \log \frac{[Fe^{+++}]}{[Fe^{++}]},$$

D'où l'on tire :

$$Eh_c = 0,00666 \log [SO_4^{--}] + 0,365 - 0,0733 \text{ pH à } 25^\circ \dots\dots\dots (16)$$



La teneur maxima en activité  $Fe^{++}$  est la suivante :

*Lorsque  $Fe(OH)_3$  précipite :*

$$\log[Fe^{++}] = \frac{E_0 - Eh}{0,059} + \log \frac{S_s}{(K_{H_2O})^3} - 3pH, \dots \quad (17)$$

S'obtient à l'aide des équations (2), (5) et (10) ou :

$$\text{Log } [Fe^{++}] = 17,84 - 17,15 Eh - 3pH \text{ à } 25^\circ \dots \quad (17')$$

Soit :

$$\log[Fe^{++}] = \frac{E_0}{0,059} - 20,85 + \log \frac{S_3}{(K_{H_2O})^3} - 0,25 \log O_2 - 2pH,$$

S'obtient à l'aide des équations (17) et (9) ou :

$$\text{Log } [Fe^{++}] = -2,98 - 0,25 \log O_2 - 2pH \text{ à } 25^\circ.$$

Elle est d'autant plus grande que le Eh est petit et que l'eau est acide, c'est-à-dire que le pH est plus faible.

*Lorsque  $FeCO_3$  précipite :*

$$\text{Log } [Fe^{++}] = \log \frac{S_{Fe}}{K'_2} - \log[HCO_3^-] - pH, \dots \quad (18)$$

L'équation (18') s'obtient à l'aide des équations (3) et (7), soit

$$\text{Log } [Fe^{++}] = -0,36 - \log[HCO_3^-] - pH \text{ à } 25^\circ \dots \quad (18')$$

Elle est d'autant plus grande que le  $[HCO_3^-]$  et le pH sont petits.

*Lorsque  $FeS$  précipite :*

$$\text{Log } [Fe^{++}] = \frac{Eh - 0,0075 \log[SO_4^{--}]}{0,0075} - 37,06 + 8pH \text{ à } 25^\circ \dots \quad (19)$$

S'obtient à l'aide des équations (4) et (11).

La précipitation des FeS ne se fait qu'à des Eh faibles < 0,15 à pH = 3 ; et Eh < -0,25 à pH = 9.

Il faut donc des Eh d'autant plus faibles que le pH est plus élevé. La précipitation n'est donc favorisée que dans les eaux acides ou dans les eaux à Eh très faibles.

Plus le HCO<sub>3</sub> est faible plus le champ de précipitation est grand, c'est-à-dire plus il a de possibilités de se faire à des pH plus élevés.

La teneur maxima en activité Fe<sup>+++</sup> est la suivante :

*Lorsque Fe(OH)<sub>3</sub> précipite :*

$$\text{Log}[Fe^{+++}] = \log \frac{S_s}{K_{H_2O}} - 3pH, \dots\dots\dots (20)$$

S'obtient à l'aide des équations (2), et (5), soit :

$$\text{Log}[Fe^{+++}] = -4,768 - 3pH \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (20')$$

*Lorsque FeCO<sub>3</sub> précipite :*

$$\text{Log}[Fe^{+++}] = \frac{Eh - E_0}{0,059} + \log \frac{S_{Fe_3}}{K_2} - \log[HCO_3^-] - pH, \dots\dots\dots (21)$$

S'obtient à l'aide des équations (3), (7), et (10), soit :

$$\text{Log}[Fe^{+++}] = \frac{Eh}{0,059} - 13,42 - \log[HCO_3^-] - pH \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (21')$$

*Lorsque FeS précipite :*

$$\text{Log}[Fe^{+++}] = 150,28 Eh - \log [SO_4^{2-}] - 50,12 + 8 pH \text{ à } 25^\circ \dots\dots\dots (22)$$

S'obtient à l'aide des équations (4), (10), et (11).

On voit ainsi que les ions Fe<sup>+++</sup> ne sont présents en quantité relativement importante que dans les eaux très acides, à pH < 3. Ces eaux sont excessivement rares, n'existent pour ainsi dire pas. Aussi les eaux, en général, ne transportent que des quantités négligeables d'ions Fe<sup>+++</sup>, tandis que les ions Fe<sup>++</sup> peuvent atteindre des valeurs relativement importantes.

**II.5.4. Teneur maxima en ions FeOH<sup>++</sup>**

La teneur maxima en ions FeOH<sup>++</sup> est beaucoup plus grande que celle des ions Fe<sup>+++</sup>. Mais eux même sont en quantité négligeable dans les eaux à pH > 3. La teneur en activité est donnée par la relation :

$$\text{Log [FeOH}^{++}] = \log K_1'' + \text{pH} + \log [\text{Fe}^{+++}] \dots \dots \dots (8')$$

$$\text{Log [FeOH}^{++}] = - 2,222 + \text{pH} + \log [\text{Fe}^{+++}] \quad \text{à } 25^\circ \dots \dots \dots (8'')$$

À 25° on a donc :

	[FeOH <sup>++</sup> ] / [Fe <sup>+++</sup> ]	[FeOH <sup>++</sup> ] + [Fe <sup>+++</sup> ]
A pH= 3	6	7
4	60	61
5	600	601
6	6000	6001
7	60000	60001
8	600000	600001
9	6000000	6000001

Lorsque Fe(OH)<sub>3</sub> précipite, les équations (8'') et (20) donnent :

$$\text{Log [FeOH}^{++}] = -6,99 - 2\text{pH}$$

Lorsque FeCO<sub>3</sub> précipite, les équations (8'') et (21) donnent :

$$\text{Log [FeOH}^{++}] = -15,642 + 16,95 \text{ Eh} - \log [\text{HCO}_3^-].$$

Lorsque FeS précipite, les équations (8'') et (22) donnent :

$$\text{Log [FeOH}^{++}] = - 52,342 + 150,28 \text{ Eh} - \log [\text{SO}_4^{--}] + 9 \text{ pH}.$$

**II.5.5. Teneur en fer lorsque  $\text{FeCO}_3$  précipite à  $25^\circ$ , avec  $[\text{HCO}_3^-] = 10^{-2}$**

On a :

$$\log[\text{Fe}^{++}] = -0,36 - \log[\text{HCO}_3^-] - pH,$$

$$\log[\text{Fe}^{+++}] = 16,95Eh - 13,42 - \log[\text{HCO}_3^-] - pH,$$

$$\log[\text{FeOH}^{++}] = -2,222 + pH - \log[\text{Fe}^{+++}] = -15,642 + 16,95Eh - \log[\text{HCO}_3^-].$$

Pour avoir la valeur de  $[\text{Fe}^{++}]$ , de  $[\text{Fe}^{+++}]$ , de  $[\text{FeOH}^{++}]$  et de  $\sum[\text{Fe}]$  pour les différentes valeurs de  $[\text{HCO}_3^-]$ , divisé par 100  $[\text{HCO}_3^-]$  de l'eau.

Pour les Eh inférieurs à +0,4, la teneur en fer est essentiellement celle des ions  $[\text{Fe}^{++}]$ , devant laquelle celles des autres activités  $[\text{Fe}^{+++}]$  et  $[\text{FeOH}^{++}]$  sont négligeables.

Pour les Eh égale +0,4 de pH = 3 à pH = 7, la teneur des activités de Fe est aussi essentiellement celle des activités  $[\text{Fe}^{++}]$ . Aux pH supérieurs à 7, les activités  $[\text{FeOH}^{++}]$  deviennent de plus en plus abondantes, s'ajoutent aux activités  $[\text{Fe}^{++}]$  et finissent par prédominer à pH = 9. Pour Eh = +0,6, de pH = 3 à pH = 4, la teneur en Fe est à peu près celle des activités  $[\text{Fe}^{++}]$ . À pH = 5, les activités  $[\text{Fe}^{++}]$  et  $[\text{FeOH}^{++}]$  sont à peu près en quantités égales. À pH = 6, il y a près de 10 fois plus d'activités  $[\text{FeOH}^{++}]$  que d'activité  $[\text{Fe}^{++}]$  et à pH = 7 jusqu'à pH = 9, la teneur totale en fer  $\sum[\text{Fe}]$  est à peu de chose près celles des activités  $[\text{FeOH}^{++}]$ , les autres activités  $[\text{Fe}^{++}]$  et  $[\text{Fe}^{+++}]$  devenant négligeables.

On a donc pour :

Eh < +0,4 :

$$\log \sum[\text{Fe}] = -0,36 - \log[\text{HCO}_3^-] - pH.$$

Eh = +0,4 :

$$pH < 7 \quad \log \sum[\text{Fe}] = -0,36 - \log[\text{HCO}_3^-] - pH$$

$$pH > 7 \quad \log \sum[\text{Fe}] = -15,642 + 16,95Eh - \log[\text{HCO}_3^-].$$

Eh = +0,6 :

$$pH < 5 \quad \log \sum[\text{Fe}] = -0,36 - \log[\text{HCO}_3^-] - pH,$$

$$pH > 5 \quad \log \sum[\text{Fe}] = -15,642 + 16,95Eh - \log[\text{HCO}_3^-].$$

**II.5.6. Teneur en fer lorsque  $Fe(OH)_3$  précipite à 25°**

$$\log[Fe^{++}] = 17,84 - 16,95Eh - 3pH,$$

$$\log[Fe^{+++}] = -4,768 - 3pH,$$

$$\log[FeOH^{++}] = -6,99 - 2pH.$$

Pour les Eh inférieurs à +0,4 et pour les Eh = +0,4 à pH < 7 ; et pour les Eh = +0,6 à pH < 4, la teneur en fer (activités) est essentiellement celle des activités  $[Fe^{++}]$ , soit approximativement :

$$\log \sum [Fe] = 17,84 - 16,95Eh - 3pH,$$

La teneur des autres activités  $[Fe^{+++}]$  et  $[FeOH^{++}]$  étant négligeables devant celle des activités  $[Fe^{++}]$ .

Pour les Eh égales à +0,4 à pH > 7 et les Eh égales à +0,6 à pH > 5, la teneur en fer (activités) est, à peu de chose près, celle des activités  $[FeOH^{++}]$  soit approximativement :

$$\log \sum [Fe] = -6,99 - 2pH,$$

La teneur des autres activités  $[Fe^{++}]$  et  $[Fe^{+++}]$  étant négligeable devant celle des activités  $[FeOH^{++}]$ .

**II.5.7. Teneur en fer lorsque FeS précipite**

$$\log[Fe^{++}] = \frac{Eh - 0,0075 \log[SO_4^{--}]}{0,0075} - 37,06 + 8pH,$$

$$\log[Fe^{+++}] = 150,28Eh - \log[SO_4^{--}] - 50,12 + 8pH,$$

$$\log[FeOH^{++}] = -52,342 + 150,28Eh - \log[SO_4^{--}] + 9pH.$$

La teneur en fer (en activités) est essentiellement celle des activités  $[Fe^{++}]$ , la teneur en fer des autres activités étant négligeable devant elle.

On a donc :

$$\log \sum [Fe] = \frac{Eh - 0,0075 \log[SO_4^{--}]}{0,0075} - 37,06 + 8pH.$$

### II.5.8. Fer dans les eaux souterraines d'origine météorique

Les quelques données précédentes permettent de mieux comprendre la géochimie du fer dans les eaux souterraines.

Mais il ne sera donné ici qu'un court aperçu de ce problème très complexe qui reste encore à approfondir.

La mise en solution du fer est surtout liée à l'altération des minéraux ferromagnésiens ou des minéraux essentiellement ferrifères, beaucoup plus dans le sol agricole ou immédiatement sous celui-ci que dans les couches profondes. Ce n'est qu'une fois ces minéraux altérés que les phénomènes de solubilisation peuvent entrer en jeu.

Dans le sol, cette mise en solution est essentiellement le fait de micro-organismes qui modifient le milieu.

La présence de matière organique, support des micro-organismes, y est indispensable. De plus, l'humidité du milieu, empêchant l'arrivée de l'oxygène, favorise la réduction. Il est ainsi nécessaire d'avoir un milieu anaérobie. Le fer est amené à l'état ferreux et passe en solution. Il pourra même y avoir production de sulfure de fer.

Le fer solubilisé peut passer directement dans les eaux souterraines, si les conditions d'oxydoréduction de pH et de  $HCO_3^-$  se maintiennent en profondeur. Par contre, s'il y a sous la zone de solubilisation une zone où les conditions d'oxydation peuvent se déclencher, aération, absence de micro-organismes, diminution de l'activité microbienne, où il y a modification du pH, du potentiel d'oxydoréduction, de la teneur en  $CO_2$  ou  $HCO_3^-$ , la précipitation d'hydroxyde ferrique peut avoir lieu. Cependant, cet hydroxyde peut encore migrer, sous forme d'ions complexes, avec la silice, l'acide humique, jusqu'à la rencontre d'un milieu précipitant. Si ces protecteurs font défaut, l'hydroxyde ferrique est très rapidement fixé par l'argile.

Si, la mise en solution est en liaison avec la destruction des minéraux dans la zone d'altération, elle peut parfois se poursuivre même avec intensité en profondeur comme cela est attesté par la présence d'eaux ferrugineuses et sulfureuses dans les nappes profondes.

La mise en solution est, ici, en rapport avec un milieu réducteur dû à la présence de matières organiques dans la couche aquifère, et vraisemblablement en liaison avec une réduction des sulfates de l'eau ou du terrain apportant des ions  $S^{2-}$  dans l'eau. Cependant, lorsque ces eaux précipitent du fer en surface, c'est toujours à l'état de  $Fe(OH)_3$ . Mais il est possible qu'en profondeur, la précipitation du fer se fasse sous forme de sulfure, comme le témoigne la présence de pyrite dans ces terrains aquifères où la précipitation de  $Fe(OH)_3$  fait défaut, car les conditions d'oxydoréduction y sont très différentes de celles de la surface.

Les données précédentes, sur la solubilité et la solubilisation du fer dans les eaux souterraines, permettent de mieux saisir les relations qui existent entre la teneur en fer des eaux et la nature des terrains.

Les eaux des roches silicatées, c'est-à-dire des granites, des gneiss, des micaschistes, des schistes, des éruptives, de même les eaux des roches siliceuses, comme par exemple des grès siliceux, des sables siliceux, des alluvions purement siliceuses, de même, enfin, les eaux des roches argileuses pures sont susceptibles de renfermer des quantités relativement importantes de fer, et il est facile de la constater.

C'est qu'en raison de la pauvreté en bases solubles susceptibles d'équilibrer le gaz carbonique dissous dans ces eaux, leur pH est faible. Et cela est d'autant plus vrai, si aux sources normales de  $CO_2$  s'ajoute, comme dans le cas de certaines eaux minérales, du  $CO_2$  d'origine volcanique. Ce faible pH permet une mise en solution importante de fer, et cette mise en solution sera naturellement d'autant plus importante que le potentiel d'oxydoréduction sera faible, comme cela peut se produire lorsque les terrains renferment des matières organiques, cela à la condition que l'eau soit dans le domaine de précipitation de  $Fe(OH)_3$ , car lorsque l'eau se trouve dans le domaine de précipitation de  $FeCO_3$ , la teneur en fer est indépendante du potentiel d'oxydoréduction.

Les eaux des roches calcaires ou dolomitiques ne contiennent, en général, pas de fer ou du fer seulement en très faible quantité. C'est que les eaux issues des calcaires ont, en général, un pH supérieur à 7, car le gaz carbonique libre, en général de moins de 100 mg/l, est équilibré par le calcium dissous. Il ne peut donc y avoir des teneurs supérieures en fer de  $10^{-5}$  moles pour des eaux ayant plus de  $10^{-3}$  moles de  $HCO_3^-$ .

Mais la présence d'eaux acides à  $\text{pH} < 7$ , issues de terrains calcaires, n'est pas impossible. Il suffit pour cela que ces eaux aient des quantités de  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{++}$  au-dessus de la normale. Le pH d'équilibre, c'est-à-dire le pH correspondant à la saturation, est en effet :

$$\text{pH}_{eq} = \log \frac{K_c'}{K_2} - \log[\text{HCO}_3^-] - \log[\text{Ca}^{++}],$$

Equation qui montre que le pH est d'autant plus faible que  $[\text{HCO}_3^-]$  et  $[\text{Ca}^{++}]$  sont plus grands et que, par conséquent, le  $\text{CO}_2$  d'équilibre est plus grand, car :

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{eq} = \frac{K_2'}{K_1 K_c'} [\text{HCO}_3^-]^2 [\text{Ca}^{++}].$$

En prenant comme valeur  $\log \frac{K_c'}{K_2} = 1,64$  à  $25^\circ$  et  $\mu = 0$ , on a effet avec :

$\sqrt[3]{[\text{HCO}_3^-]^2 [\text{Ca}]}$	$\text{HCO}_3$ mg	pH
$6,6 \cdot 10^{-3}$	406	6
$2,1 \cdot 10^{-2}$	1 280	5
$6,6 \cdot 10^{-2}$	4 060	4
$2,1 \cdot 10^{-1}$	12 800	3

$\text{HCO}_3^-$  en mg/l, en posant ici  $\text{HCO}_3^- = \text{Ca}^{++}$ .

Les eaux issues des roches carbonées, c'est-à-dire des houilles, des lignites ou des tourbes, sont généralement acides. Leur pH est, le plus souvent, bien inférieur à 7. Aussi les voit-on fréquemment contenir du fer, en quantité appréciable, en solution. Mais ce qui favorise surtout leur grande teneur en fer, c'est que ces eaux peuvent avoir des potentiels d'oxydoréduction très faibles.

D'ailleurs, avec des potentiels nuls ou négatifs, ces eaux sont susceptibles de renfermer aussi de grandes quantités de fer, même dans le cas de pH élevés.



Enfin, un dernier cas d'eau ferrugineuse est celui d'eaux sulfatées ferrugineuses des terrains pyriteux ou alunifères. Elles sont caractérisées par une haute teneur en  $\text{SO}_4^-$ , la présence possible de  $\text{H}_2\text{SO}_4^-$ , la haute teneur en  $\text{Fe}^{++}$ , mais parfois une faible teneur en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^-$ . Ces eaux résultant de l'oxydation des pyrites, oxydation qui donne naissance à des ions  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Fe}^{++}$  et  $\text{Fe}^{+++}$  facilement mis en solution. La production d'acide sulfurique chasse le  $\text{CO}_2$  des eaux, mais à la condition que le terrain aquifère ne soit pas calcaire, faute de quoi cet acide serait neutralisé. Naturellement, l'oxydation des pyrites indique que les eaux peuvent avoir un pH très faible.

CHAPITRE III

CALCUL DES PUIITS  
ET FORAGES

### III.1. INTRODUCTION

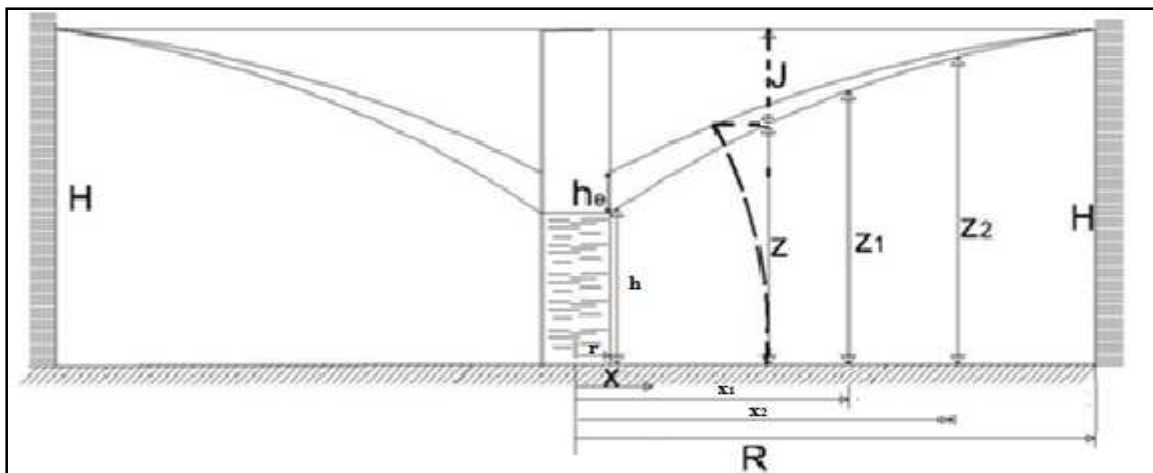
L'accroissement de la population au monde, a fait apparaitre un manque en eau. A fin de dénouer ce problème, l'être humain a pensé aux eaux souterraines et pour exploiter cette source, il a fallut forer la terre jusqu'à atteindre ce chère minerais, et par là, l'apparition des forages et des puits. Les lois qui agissent sur l'écoulement dans les forages et les nappes sont expliquées dans ce chapitre.

### III.2. PUIITS ET FORAGES PARFAITS (ATTEIGNANT L'IMPERMEABLE), EN NAPPE LIBRE. MOUVEMENT LAMINAIRE, ALIMENTATION ARRIERE [5]

#### III.2.1. L'imperméable est horizontal

##### (a) Formule de Dupuit

Supposons que l'on ait un puits de rayon  $r$  traversant une nappe libre jusqu'à son substratum imperméable (figure III.1). L'eau entre dans le puits par ses parois. Le puits se trouve au centre de la nappe de forme circulaire. La nappe a une épaisseur uniforme  $H$ . Si l'on pompe avec un débit  $Q$ , la surface de la nappe sera rabattue d'une hauteur  $H - h$  au puits et, autour de ce puits, le rabattement s'étendra, mais de moins en moins important jusqu'à la limite  $R$ , où l'on admettra que la hauteur de la nappe sera maintenue à la valeur  $H$  quel que soit le débit  $Q$ .



*Figure III.1 : Puits parfait*

Autrement dit, on suppose que la nappe ne présente aucun écoulement lorsqu'il n'y a pas de pompage, et que lorsque le pompage est exercé la nappe est alimentée par son périmètre de rayon R, où la hauteur d'eau est maintenue constante et égale à H.

La surface de la nappe se trouve ainsi déprimée en un cône autour du forage.

Soit un point de surface de la nappe de coordonnées (x, z). La perte de charge y est  $J = H - Z$ , la vitesse du filet y est : avec k : coefficient de perméabilité.

$$v = k \frac{dj}{-dl} = \frac{-dz}{-dl}$$

dl étant pris sur le trajet du filet liquide. Mais Dupuit simplifie et confond dx avec dl, c'est-à-dire confond le sinus avec la tangente, ce qui est admissible loin de l'axe du puits, mais ne l'est plus au voisinage.

De plus, Dupuit suppose que la vitesse est la même sur toute la hauteur Z, Le débit, Q, de l'eau allant vers le puits, traverse avec cette vitesse V la section cylindrique de rayon x et de hauteur Z, et de surface  $2\pi \cdot x \cdot Z$ . On a donc:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot x \cdot Z \cdot k \cdot \frac{dz}{dx}$$

ce qui, après intégration, donne :

$$Q \log x = K \pi Z^2 + C.$$

Aux conditions aux limites :  $Z = h$  à  $x = r$  et  $Z = H$  à  $x = R$  :

On a :

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\log \frac{R}{r}}.$$

Et entre ces deux limites, on a :

soit :

$$Q = \frac{\pi K (Z^2 - h^2)}{\log \frac{x}{r}}$$

Soit :

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - Z^2)}{\log \frac{R}{r}}$$

Soit :

$$Q = \frac{\pi K (Z_2^2 - Z_1^2)}{\log \frac{x_2}{x_1}}$$

Ainsi, la forme du cône a pour expression :

$$Z^2 = h^2 + (H^2 - h^2) \frac{\log \frac{x}{r}}{\log \frac{R}{r}}$$

Les hydro-isohypses du cône seront donc des cercles, d'autant plus écartées les unes des autres qu'elles seront plus éloignées du puits.

La formule de Dupuit comprend la confusion de  $dx$  avec  $dl$ . Autrement dit, tous les filets liquides circuleraient horizontalement. Or, seuls les filets liquides situés à la surface de substratum peuvent être horizontaux. A la surface de la dépression de la nappe, les filets sont obliques. Et les filets intermédiaires seront d'autant plus obliques qu'ils seront plus près de la surface de la nappe. Il en résulte que les équipotentielles ne seront plus des verticales comme dans l'hypothèse de Dupuit, mais des courbes. De ce fait, sur une même verticale, les potentiels iront en décroissant vers la base. Le potentiel des filets de base sera plus faible que celui des filets de la surface. Enfin, comme pour les nappes libres, il y a, à l'entrée de l'eau dans le puits, une surface d'émergence de hauteur  $h_e$  se raccordant avec la surface réelle de la nappe.

La courbe de Dupuit ne correspond pas ainsi à la surface de la nappe, mais aux hydrohypes des filets liquides circulant à la base de la nappe.

Les hauteurs,  $Z$ , de la formule de Dupuit, celles des hydrohypes des filets de la base, s'obtiennent facilement en descendant des tubes piézométriques jusqu'à l'imperméable. Cela permet d'utiliser la formule de Dupuit, qui répétons-le, ne s'applique qu'aux filets de base, sans erreur notable.

Mais il est à remarquer qu'à une distance  $1,5 H$  du puits, la courbe de Dupuit est si voisine de la surface de la nappe, qu'on peut pratiquement les confondre, ce qui dès lors permet de ne descendre les tubes piézométriques que jusqu'à la partie supérieure de la nappe.

(b) Formule de Thiem :

Comme nous le verrons, il est souvent difficile d'évaluer  $R$ , ce qui rend aléatoire l'application de la formule de Dupuit :

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\log \frac{R}{r}}$$

Aussi Thiem préconise d'employer les formules :

$$Q = \frac{\pi K (Z^2 - h^2)}{\log \frac{x}{r}}$$

ou

$$Q = \frac{\pi K (Z_2^2 - Z_1^2)}{\log \frac{x_2}{x_1}}$$

Ce qui peut être fait en enfonçant des tubes piézométriques aux distances  $x$ .

### III.2.2. Zone d'émergence ou zone de suintement

La surface du cône ne rejoint pas directement la surface de l'eau du puits, mais elle arrive contre la paroi du puits à une certaine hauteur  $h_e$  au-dessus de l'eau.

Le long de cette hauteur, l'eau émerge ou suinte, d'où le nom de hauteur d'émergence ou de suintement. Cette hauteur est notamment nécessitée par le fait que l'on ne peut concevoir une vitesse infiniment grande d'entrée des filets liquides dans le puits lorsque  $h = 0$ .

La grandeur de la hauteur d'émergence est extrêmement difficile à calculer.

Elle serait, d'après R. Ehrenberg (1928), et G. Nahrgang (1954 et 1956), égale à :

$$h_e = 0,5 \frac{(H - h)^2}{H}$$

III.3. PUIITS DANS UNE NAPPE A SURFACE PIEZOMETRIQUE INCLINEE

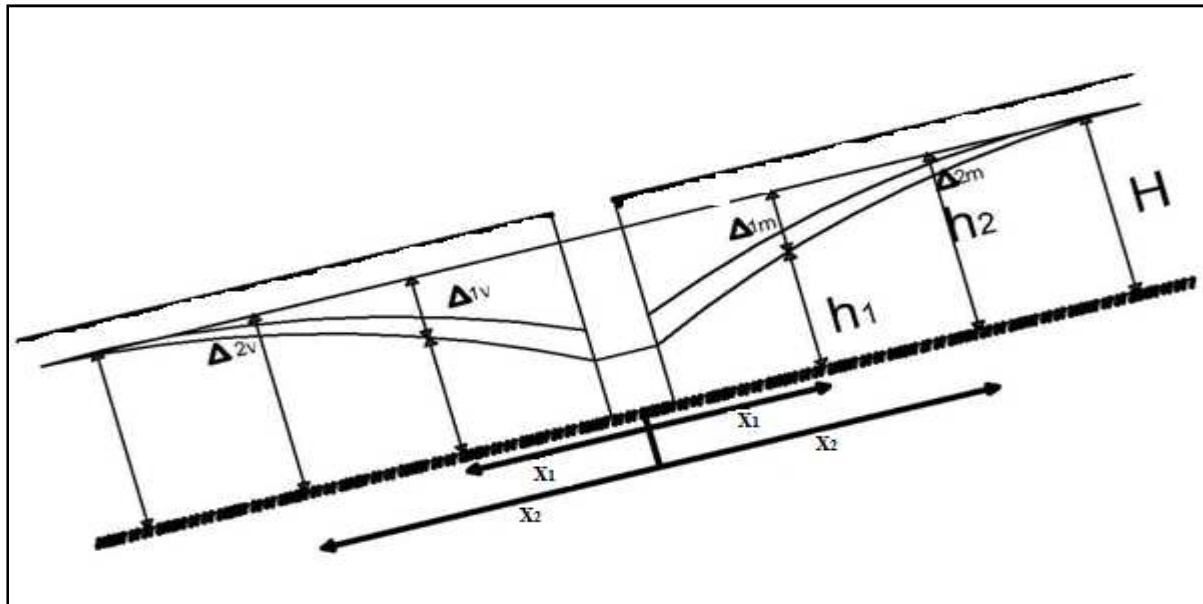


Figure III.2 : Puits dans une nappe libre inclinée

Dans les cas précédents, on n'envisageait qu'une nappe horizontale, c'est-à-dire sans écoulement préalable, à écoulement provoqué seulement par pompage, le niveau H de l'eau restant constant aux limites. L'écoulement en cours de pompage était strictement radial. Or, les nappes présentent toujours un écoulement. Les nappes sans écoulement sont des exceptions. Mais souvent la pente de la surface piézométrique est si faible que les considérations précédentes sur les débits des puits peuvent être considérées, ce qui nous conduit à la formule limitante de Wenzel et à la formule du gradient.

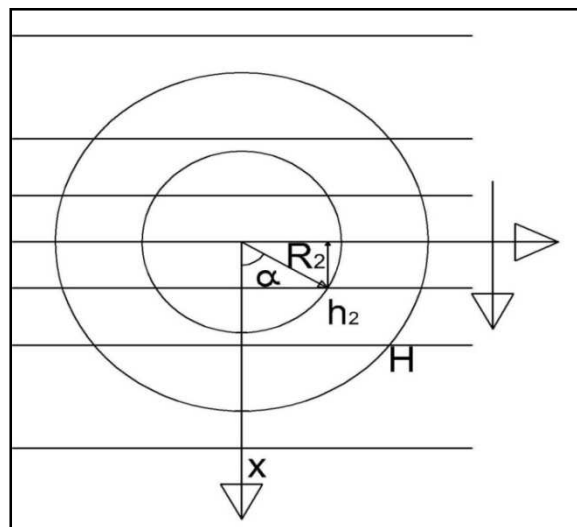


Figure III.3 : Cône de dépression d'un puits, superposé à une surface inclinée d'une nappe

### III.3.1. Formule limitante de Wenzel

Wenzel (1942) a perfectionné la méthode de Thiem, pour ses applications à des nappes inclinées. C'est sa méthode à formule limitante (figure III.2) sur laquelle  $h_1 = Z_1$ ,  $h_2 = Z_2$  :

$$Q = K\pi \frac{Z_2^2 - Z_1^2}{\log \frac{x_2}{x_1}}$$

semblable à celle de Thiem. C'est certes une méthode empirique, qui donne cependant des résultats exacts, à la condition de suivre une certaine procédure.

On pompe jusqu'à l'équilibre. A deux points diamétralement opposés (de préférence amont et aval) et situés à une distance  $x_1$ , il prend la moyenne  $\Delta_1$  des abaissements de la nappe,  $\Delta_{1m}$  en amont et  $\Delta_{1v}$  en aval. Il procède de même pour deux autres points situés sur la même ligne, à une distance  $x_2$  du puits, où les rabattements sont  $\Delta_{2m}$  et  $\Delta_{2v}$ . On n'utilise que les rabattements ayant atteint l'équilibre, mais suffisamment loin du puits de manière à se placer à l'extérieur de la zone où la composante verticale du mouvement de l'eau est sensible. Il faut donc se placer à une distance  $x > 1,5 H$ . On peut écrire :

$$Q = K\pi \frac{(Z_2 + Z_1)(Z_2 - Z_1)}{\log \frac{x_2}{x_1}}$$

Ou

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\log \frac{x_2}{x_1}}{(Z_2 + Z_1)(Z_2 - Z_1)}$$

Avec

$$Z_2 + Z_1 = 2H - \frac{1}{2}(\Delta_{1m} + \Delta_{1v} + \Delta_{2m} + \Delta_{2v}),$$

$$Z_2 - Z_1 = \frac{1}{2}(\Delta_{1m} + \Delta_{1v} - \Delta_{2m} - \Delta_{2v}),$$

Lorsque la nappe est artésienne :

$$Z_2 + Z_1 = 4H.$$

C'est la méthode de Thiem dans laquelle on prend pour  $\Delta$ , la moyenne des abaissements de deux points diamétralement opposés et situés à égale distance du puits.



### III.3.2. Formule du gradient (Wenzel, 1942)

Lorsque l'équilibre s'est approximativement établi au cours d'un pompage à débit constant  $Q$  dans un puits, très peu d'eau de ce débit a son origine dans l'approfondissement du cône de dépression autour du puits. Si la nappe est horizontale, les filets liquides arrivent tous avec la même vitesse tous azimuts, le débit, à travers chaque surface verticale cylindrique de la nappe et située à la distance  $x$  de l'axe du puits et où la nappe a une inclinaison  $i$  et une hauteur  $Z$ , est:

$$Q = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot x \cdot Z \cdot i$$

et l'on a également pour les autres surfaces :

$$Q = 2\pi K x_1 Z_1 i_1 = 2\pi K x_2 Z_2 i_2 = 2\pi K x_3 Z_3 i_3 = \dots$$

Mais les nappes sont généralement inclinées, et l'écoulement vers le puits n'est pas partout normal à la section cylindrique autour du puits. Il l'est seulement le long d'une ligne qui s'étend directement en amont et en aval dans le sens primitif de l'écoulement de la nappe et passant par l'axe du puits.

Dans une section donnée, à une distance donnée du puits en amont, l'écoulement sera plus grand qu'en aval à travers une section de même grandeur, située à la même distance. Il en résulte que le gradient hydraulique, provoquant l'écoulement, est approximativement égal à la moyenne des gradients amont  $i_m$  et aval  $i_v$ , soit :

$$Q = 2\pi K x \frac{(Z_m + Z_v)}{2} \frac{(i_m + i_v)}{2}$$

D'où :

$$K = \frac{2Q}{\pi x (Z_m + Z_v) (i_m + i_v)}$$

dans laquelle  $Z_m$  et  $Z_v$  sont les hauteurs de la nappe à la distance  $x$  de l'axe du puits,  $Z_m$  en amont,  $Z_v$  en aval.

Le gradient hydraulique ne peut être naturellement déterminé par l'observation du rabattement du niveau de l'eau du puits. Mais on peut l'estimer d'assez près, à l'aide de méthodes graphiques. On établit d'abord un profil de la nappe, puis, après pompage jusqu'à l'équilibre, un profil du cône de dépression à l'aide du relevé du niveau de l'eau dans des puits

d'observation, situés sur une ligne droite dirigée vers l'amont et l'aval du puits et à des distances mesurées. Les points du graphique sont réunis par une courbe.

Le gradient hydraulique  $i$  à la distance  $x$  est à peu près égale à  $i = \Delta/(2 b)$ ,  $\Delta$  étant la différence d'altitude qui existe entre deux points situés à la distance  $b$  de part et d'autre de  $x$ .

On a donc :

$$Q = \pi K x \frac{(Z_m + Z_v)(\Delta_m + \Delta_v)}{4b}$$

$$K = \frac{4bQ}{x\pi(Z_m + Z_v)(\Delta_m + \Delta_v)}$$

$\Delta_m$  et  $\Delta_v$  étant les différences d'altitude de part et d'autre d'un point  $x$  en amont et d'un point  $x$  en aval. On choisit généralement pour la distance  $b$  la valeur de 3 m.

### III.3.3. Formule générale

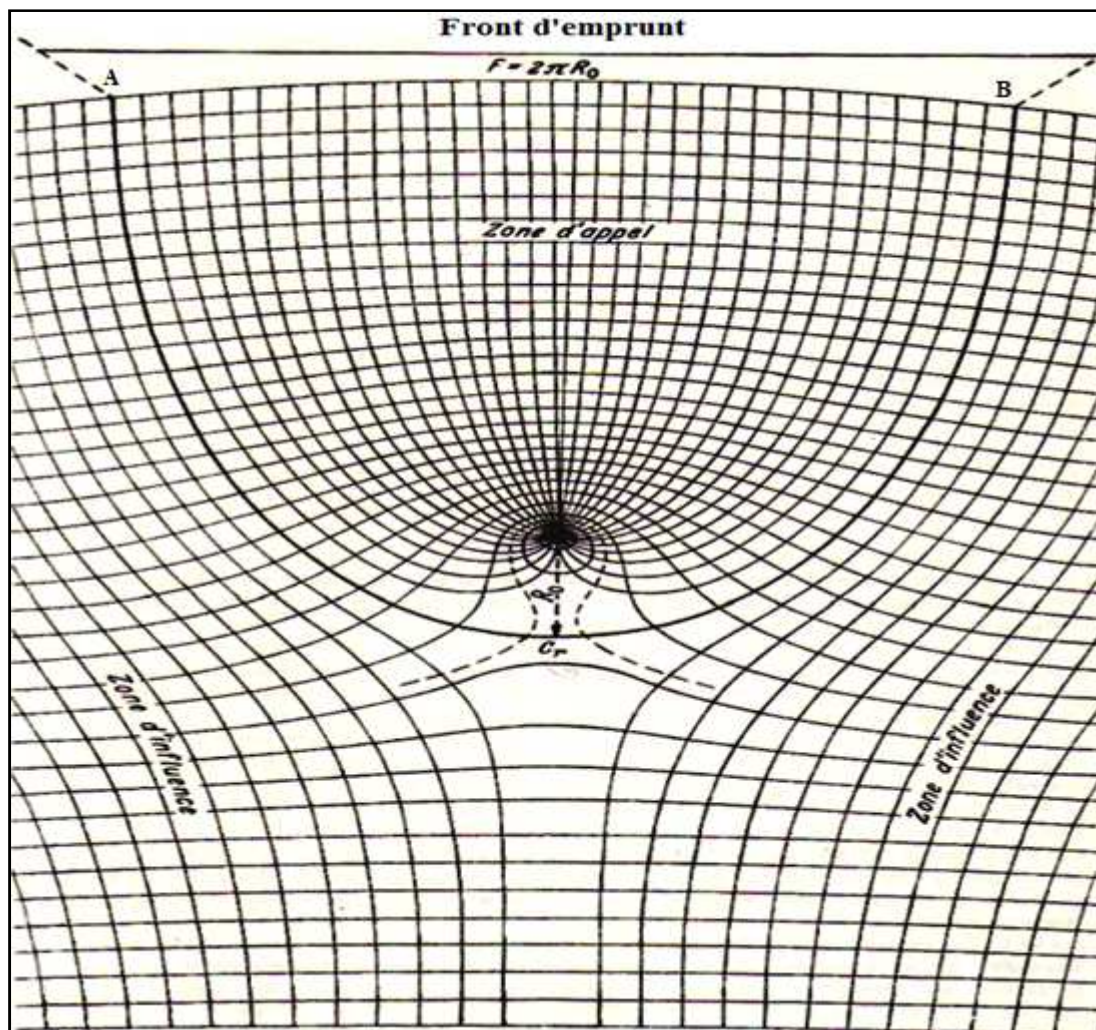
Examinons maintenant le cas plus général d'une nappe à surface piézométrique inclinée qui sera ici de dimension infinie.

Supposons un puits dans une nappe cylindrique, c'est-à-dire ayant un écoulement. Les lignes iso piézométriques ou les hydro-isohypses sont parallèles les unes aux autres et à l'axe  $y$  de la nappe. Les lignes de courant sont également parallèles les unes aux autres et à l'axe  $x$  de la nappe.

Lorsque le puits ou le forage débite, les filets liquides se recourbent pour aboutir latéralement et à la partie aval du forage ou du puits (figure III.4).

De ce fait, les lignes iso piézométriques se resserreront et, au contraire, s'écartent les unes des autres vers l'aval. En amont, la pente piézométrique sera dirigée vers l'aval comme auparavant, mais sera plus élevée, tandis que, immédiatement en avant du forage, il y aura une contre-pente jusqu'à une crête  $R_0$ , au-delà de laquelle la pente sera de nouveau dirigée vers l'aval. Tous les filets liquides, situés en dehors de la ligne  $A R_0 B$ , s'écartent de la dépression piézométrique du forage et n'aboutissent pas par conséquent au forage, tandis que les filets traversant la ligne  $AB = 1$  sont absorbés par le forage.

La nouvelle disposition du flux liquide est la résultante du flux de la nappe et du flux dirigé radialement vers le forage. Elle est la résultante des pressions régissant l'écoulement de la nappe et distribuées suivant les lignes iso piézométriques, parallèles à la nappe, et des pressions régissant l'écoulement de l'eau vers le forage par suite de l'appel et distribuées suivant des cercles concentriques au tubage. Les nouveaux potentiels sont en chaque point égal à la somme du potentiel de la nappe et du potentiel de l'écoulement vers le puits.



*Figure III.4 : Lignes de courant et équipotentiels autour d'un puits ou forage, dans une nappe inclinée*

Soit  $i$  la pente de la surface piézométrique de la nappe,  $H$  la hauteur de la nappe aquifère. Puisque le puits capte le front  $l$  de la nappe, on a donc pour débit du puits :

$$Q = K.H.l.i.$$

... (1

D'après Smrecker (1914), Forscheimer (1930), Kozeny (1953), on aurait :

$$1 = 2 \pi R_0 \quad \dots (2)$$

C'est-à-dire aussi :

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot K \cdot R_0 \cdot H \cdot i \quad \dots (3)$$

$R_0$  étant compté sur le plan incliné de l'imperméable et non sur le plan horizontal.

Il suffit donc de déterminer  $R_0$ .

Smrecker montre que  $R_0$  se trouve sur une ligne perpendiculaire au courant le long de laquelle tous les rayons, issus du puits et la recoupant, présentent un maximum de potentiel, c'est-à-dire un maximum de hauteur d'eau. Ceci permet de déterminer facilement  $R_0$  à l'aide de piézomètres.

La ligne de partage du domaine allant au puits est donnée par l'équation :

$$Y = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \frac{Q}{2\pi K H i} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$$

Or, si l'on compte les hauteurs de la nappe au-dessus de l'imperméable et non au-dessus de l'horizontale, on a comme pour les puits à substratum horizontal :

$$Q = K\pi \frac{H^2 - h^2}{\log \frac{R}{r}} \quad \dots (4)$$

les axes des  $x$  et  $y$  étant placés sur le plan de l'imperméable,  $R$  et  $r$  étant donc comptés sur ce plan.

En combinant les équations (3) et (4) (Schöeller, 1956), on obtient :

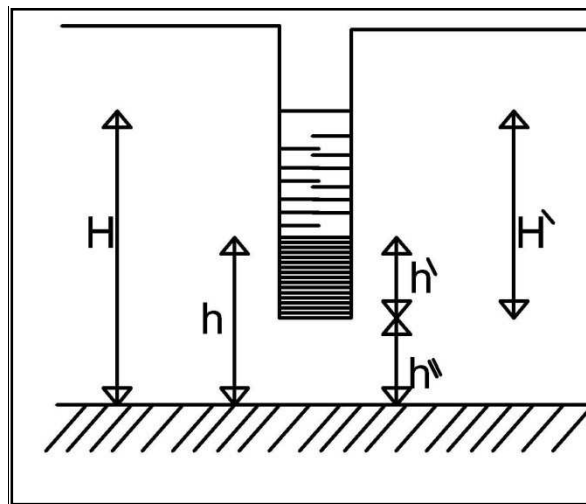
$$R_0 \log \frac{R_0}{r} = \frac{H^2 - h^2}{2iH}$$

ce qui permet de calculer  $R_0$ , en fonction de  $h$ , c'est-à-dire de  $\Delta = H - h$ , et ensuite de calculer le débit  $Q$  correspondant à l'aide des équations (3) ou (4).

**III.4. PUIITS ET FORAGES EN NAPPES LIBRES ET N'ATTEIGNANT PAS LE FOND IMPERMEABLE. PUIITS IMPARFAITS**

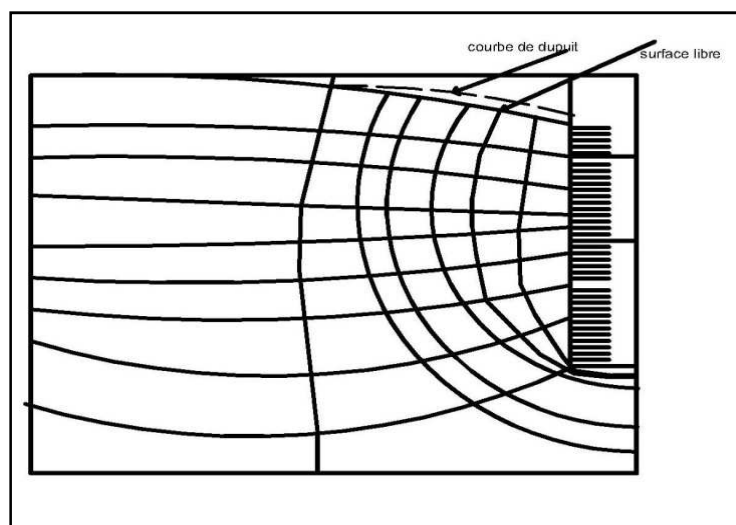
Diverses formules ont été données pour passer des puits parfaits aux puits imparfaits.

Soient :  $H'$ , la hauteur de l'eau dans le puits, avant pompage;  $h'$ , la hauteur de l'eau après pompage;  $H$ , la hauteur de la surface de la nappe au-dessus de l'imperméable;  $h$ , la hauteur correspondant à  $h'$ , après pompage, comptée à partir du substratum:  $h'' = h - h'$  (figure III.5).



*Figure III.5 : Puits imparfait*

Lorsque le puits n'atteint pas le substratum, puits imparfait, la surface libre du cône de dépression se trouve au-dessous de la courbe de Dupuit (Nahrgang, 1956) (figure III.6).



*Figure III.6 : Lignes de courant, équipotielles, surface libre et courbe de Dupuit dans le cas d'un puits imparfait (d'après Nahrgang, 1956)*

Porchet remplace dans les formules des puits parfaits  $H$  par  $H' + r/2$  et  $h$  par  $h' + r/2$ .

On a ainsi:

$$Q = K\pi \frac{(H' + \frac{r}{2})^2 - (h' + \frac{r}{2})^2}{\log \frac{R}{r}}$$

Ou

$$Q = K\pi\Delta \frac{(H' + h' + r)}{\log \frac{R}{r}}$$

Avec :  $\Delta = H - h = H' - h'$ .

### III.5. PUIITS ET FORAGES EN NAPPE CAPTIVE ET ATTEIGNANT L'IMPERMEABLE.MOUVEMENT LAMINAIRE

#### III.5.1. La surface piézométrique de la nappe est horizontale

##### a) Formule de Dupuit

Supposons que l'on ait une nappe captive circulaire de rayon  $R$  et d'épaisseur  $E$ . Le forage est situé au milieu. A la distance  $R$  du forage, se trouve donc la limite de la nappe.  $Z$  est la hauteur de l'hydrohypse au-dessus de l'horizontale passant par l'ouverture du forage,  $r$  est le rayon du forage.

En faisant fonctionner le forage, on crée autour de celui-ci une diminution de hauteur des hydrohyses de la nappe, comme pour les puits en nappe libre.

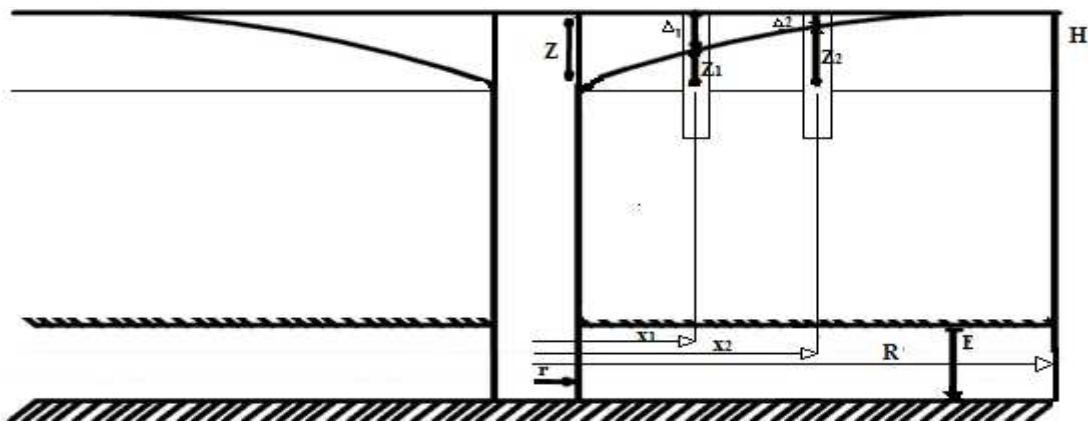


Figure III.7 : Forage parfait dans une nappe captive



Mais ici la nouvelle surface ne correspond plus à la surface de la nappe. Elle est virtuelle si l'on peut dire, mais peut être mise en évidence à l'aide de tubes piézométriques (figure III.7).

A la distance  $x$ , la vitesse de circulation de l'eau est

$$V = -K \frac{dZ}{dx} \quad \dots (5)$$

Le débit passant à travers le cylindre de rayon  $x_1$ , et de hauteur  $E$ , est donc :

$$Q = -2\pi K x_1 E \frac{dZ}{dx} \quad \dots (6)$$

C'est le débit du forage.

L'intégration donne :

$$Q \log x = -2\pi K E Z + C \quad \dots (7)$$

On a donc entre les limites  $r$  et  $R$  :

$$Q = 2\pi K E \frac{Z}{\log \frac{R}{r}} \quad \dots (8)$$

et entre ces limites :

$$Q = 2\pi K E \frac{\Delta_1}{\log \frac{R}{x_1}} \quad \dots (9)$$

$$Q = 2\pi K E \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\log \frac{x_2}{x_1}} \quad \dots (10)$$

$$Q = 2\pi K E \frac{Z - \Delta_1}{\log \frac{x_1}{r}} \quad \dots (11)$$

La forme du cône a pour expression :

$$\Delta x = Z \frac{\log \frac{R}{x}}{\log \frac{R}{r}}$$

b) Formule de Thiem.

Certaines nappes captives sont situées à faible profondeur de telle sorte que l'on peut implanter des tubes piézométriques dans la nappe. Et, d'autres fois, il peut y avoir des forages profonds suffisamment rapprochés pour servir de tubes piézométriques. On appliquera donc les formules précédentes, (10) ou (11).

c) Formule de Wenzel, en nappe inclinée :

$$Q = \pi K E \frac{\Delta_1 m + \Delta_1 v - \Delta_2 m - \Delta_2 v}{\log \frac{x_2}{x_1}}$$

d) Méthode du gradient :

La méthode est la même qu'en nappe libre, mais  $h_m = h_v = E$ . On a alors :

$$Q = \pi K R E \frac{\Delta m + \Delta v}{2b}$$

### III.6. PUIITS ET FORAGES EN NAPPE CAPTIVE NE DESCENDANT PAS JUSQU'A L'IMPERMEABLE. PUIITS IMPARFAITS

Lorsque le forage ne pénètre dans le terrain aquifère que sur une longueur  $l$ , d'après Kozeny (1953),  $E$  doit être remplacé par:

$$E' = l \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r}{2l}} \cos \frac{\pi l}{2E} \right)$$

Et l'on a :

$$Q = \frac{2\pi K \Delta}{\log \frac{R}{r}} l \left( 1 + 7 \sqrt{\frac{r}{2l}} \cos \frac{\pi l}{2E} \right)$$

Si le forage n'atteint que le toit, sans percer la couche aquifère :

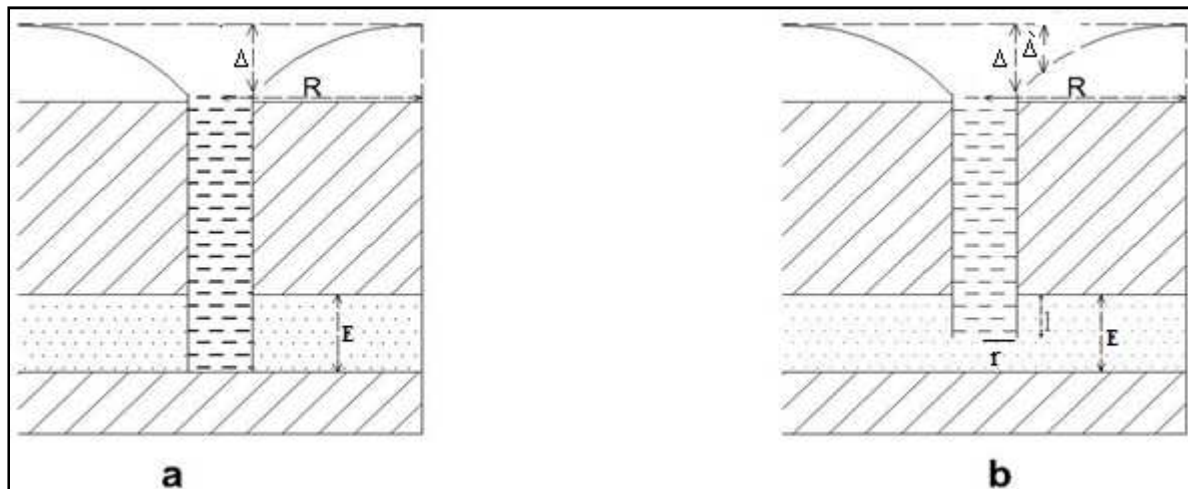
$$Q = 2\pi K \frac{\Delta}{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}}$$

Comme  $1/R$  peut être le plus souvent négligé devant  $1/r$  :

$$Q = 2 \pi K r \Delta.$$

Li, Bock et Benton (1954) ont donné une autre formule s'appliquant au cas où le forage ne traverse pas toute l'épaisseur de l'aquifère. Cette formule est préférable. En effet, si la formule de Kozeny donne des résultats raisonnables en pratique, elle a cependant certaines limitations. En effet, la formule de Kozeny n'est pas exacte pour de très grandes valeurs de  $R$ , contrairement à celle de Li, Bock et Benton.





**Figure III.8 :** a, forage dans une nappe captive et traversant toute l'épaisseur de la couche aquifère;

b, forage dans une nappe captive et ne traversant que partiellement la couche aquifère

On a d'après ces auteurs :

$$Q = 2\pi KE \frac{\Delta - \Delta'}{\log \frac{R}{r}}$$

Et

$$A = \left[ \left( \frac{E}{l} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

Dans laquelle :

$$\Delta' = \frac{Q}{2\pi KE} \left[ \left( \frac{E}{l} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

Ce qui, par conséquent, donne :

$$Q = \frac{2\pi KE \Delta}{\log \frac{R}{r} + \left[ \left( \frac{E}{l} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}}$$

Et l'on a :

$$n = \frac{3}{4} \left( \frac{E}{r} \right)^{0.05} \cong 3/4.$$

CHAPITRE IV

ETUDE ET  
TRAITEMENT DE  
L'EAU DU FORAGE  
DE BOUZGUÈNE

#### IV.1. PRESENTATION DE LA REGION DE BOUZGUENE

##### IV.1.1. Présentation géographique

Bouzeguène est une commune et une daïra de la wilaya de Tizi-Ouzou, située à l'extrême Est, à environ 70 km.

La daïra de Bouzeguène compte quatre communes : At Ziki, Bouzeguène, Illoula Oumalou et Idjeur. La superficie de la daïra est de 209,97 Km<sup>2</sup> pour une population de 54 676 habitants.

La commune de Bouzeguène est bordée par la commune de Idjeur au Nord, de Ifigha, au Nord-Ouest, de la commune d'Illoula Oumalou à l'Ouest et au Sud-ouest, par la commune de At Ziki au Sud, et à l'Est par la wilaya de Bejaïa notamment avec les communes d'Akfadou, Chemini et Ouzellaguen. La commune de Bouzeguène s'étend sur 66,90 km<sup>2</sup> et compte 28 617 habitants résidents, ce qui donne une densité de 428 hab/Km<sup>2</sup>. Elle compte en plus une forte communauté à l'étranger notamment en France.



**Figure IV.1 :** Vue des terres de Bouzeguène depuis Tagounits Aït Yahia

La commune est composée de 24 villages :

- 1) Ait Ikhlef (At Ixlef)
- 2) Ait Sidi Amar (At Sidi Amar)
- 3) Aït El Karne (At el qarn)
- 4) Ait Salah (At Salah)
- 5) Ait Ferrache (At Fer3ac)
- 6) Ait Iken (At Yiken)
- 7) Ibekaren (Ivekkaren)
- 8) Ibouyisfene (Ibuyisfen)
- 9) Sahel (Sahel)
- 10) Houra (Hura)
- 11) Thazrout (Tazrutt)
- 12) Ait Azouane (At 3ezwan)
- 13) Ait Semlal (At semlal)
- 14) Ahrik (Ahriq)
- 15) Bouzeguène village (Wizgan village)
- 16) Ighil Tizi Boa (Igil Tizi Bwa)
- 17) Ihitoussen (Ihitusen)
- 18) Ait Mizare dit Ait Sidi Hend ouali (At Mizar)
- 19) Ikoussa (Ikusa)
- 20) Takoucht (takuct)
- 21) Thaourirt (Tawrirt)
- 22) Tizouine (Tizuyin)
- 23) Ait Said (At Said)
- 24) Mouya (Muya)

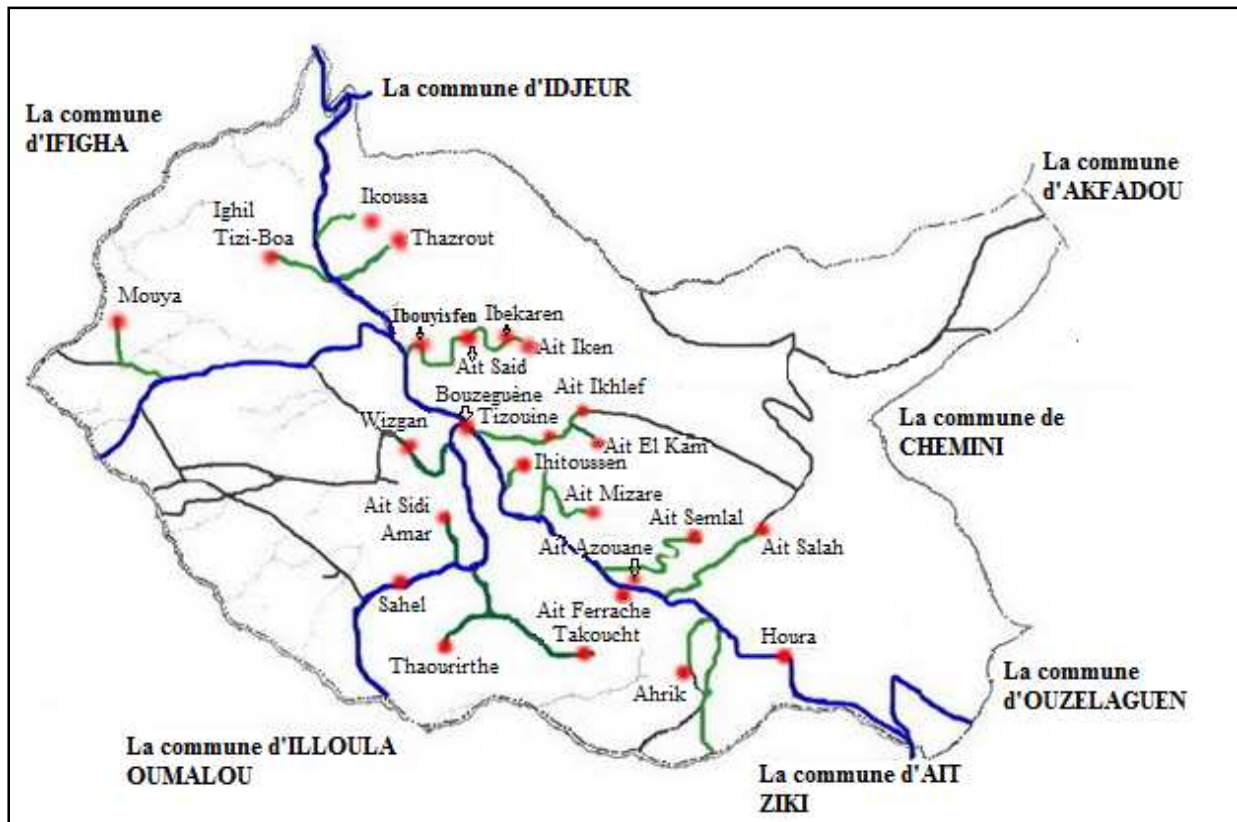


Figure IV.2 : Carte représentative de la commune de bouzguène

#### IV.1.2. Aperçu stratigraphique et tectonique

La chaîne littorale est formée d'un axe crétacé, constitué par des argiles schisteuses ou feuilletées de teinte plus ou moins foncée, et des lits de quartzites ou des grès très silicieux, généralement disloqués et fragmentés, terrains broussailleux, d'un parcours pénible profondément entaillés par les nombreux ravins qui découpent ces contreforts d'aspect sauvage et monotone.

La zone crétacée n'occupe que la partie moyenne et basse des contreforts, dans les sommets et les croupes sont occupées par les grès éocènes ; le relèvement général des assises vers le Nord, témoigne de la tendance au déversement des plis, dont la nature schisteuse des terrains ne permet guère de reconnaître l'allure compliquée.

La zone importante des argiles et grès médjaniens dont les bancs supérieurs peuvent se suivre avec netteté, occupe la moitié orientale des contre forêts, notamment dans les zerk-faoua, où les assises atteignent des altitudes de 300 à 400 m, ces couches sont repliées sur les

contre forêts au Nord de Tamgout, et déversées au Nord, sur une zone étroite d'argile numidienne (Tagmounte) le promontoire d'azze foune est constitué par les assises de grès et d'argile schisteuse, dans les couches s'inclinent au Sud, depuis la falaise jusque au sommet.

La transgression de numidien étant les bancs de grès et l'assise argileuse inférieure fait défaut, l'axe de la chaîne littorale est formé par un anticlinale numidien, dont l'érosion n'a laissée sur le flanc Nord que des témoins, plus ou moins disloqués, occupent les sommets des contre fort et les promontoires saillants des Flisset El Bahr. La zone boisée s'étend en majeure partie sur les grès numidiens. Dans le développement prépondérant dans la région forestière de l'Est (forêt de beni ghobri) ou les clairières sont occupées par les argiles sous-jacentes ou grès. Cette région parente constituée par un bombement anticlinale, dont l'axe, orienté sensiblement du Nord au Sud, de Tamgout à Yakarouren, est accidenté de plissement secondaire et des fractures, notamment dans le Djebel Zrib, le pendage des grès vers l'Ouest on amène les lambeaux jusqu'au voisinage de Sebaou, sous Azazga et Bouzeguène ; à l'Est les bancs s'infléchissent vers la coupure de l'Oued El Hammam, les dislocations des grès et les glissements sur les pentes, étendent la zone forestière sur ces terrains d'éboulés, propice à la végétation arborissante.

#### GRES NUMIDIEN :

Grès quartzeux, souvent friable, développé dans la région forestière d'Ait-Ghobri, région d'Azazga, bouzeguène et d'Yakouren, ou ces grès se rattachent au massif de l'Akfadou. Le Tamgout appartient à la même assise où les grès atteignent jusqu'à 100 m d'épaisseur. Sur la crête de la chaîne littorale, des lambeaux de ces grès sont échelonnés en masse rocheuses plus ou moins importantes.

#### ARGILES SCHISTEUSES ET GRES MEDJANIENS :

Des couches argilo-schisteuses, de teinte grise ou verdâtre, intercalées de bancs de grès silicieux et de lits de calcaires marneux, à stratifications nettes représentent l'étage inférieur (medjanien) de l'Eocène supérieur. Les plaquettes de grès sont parfois recouvertes de traces sinueuses, vraisemblablement rapportées à des anilides, cette assise très puissante occupe la majeure partie de versant Nord dans la chaîne littorale. Le terrain généralement broussailleux et inculte sauf sur certaines pentes adoucies.

ARGILES ET GRES (NUMIDIEN INFERIEUR) :

Puissante assise d'argiles feuilletées, grises ou verdâtres, très délitescentes, intercalées de petits lits de grès, de quartzites noirs, de calcaires marneux à fucoides.

Cette assise d'épaisseur très variable pouvant atteindre 150 m, donne lieu à un terrain argileux au les glissements sont fréquents, avec entrainement sur les pentes de grès qui surmontent en concordances. Les pentes ravinées occupent les versants des ravins qui entaillent profondément le massif forestier dans lequel ils constituent de vastes clairières. Ces argiles peuvent manquer pour être très réduites en épaisseur sous les grès.

Les éboulis de grès numidiens sur ces argiles, occupant de vastes surfaces, en grande partie boisées.

REGIME DES EAUX :

L'assise des grès numidiens produit des réservoirs dont l'écoulement donne lieu à de nombreuses sources, au contact des argiles sus-jacentes. Aussi, les villages kabyles enveloppent d'une ceinture les principaux massifs gréseux. Les éboulis de grès jouent un rôle analogue ; la répartition des agglomérations des Ait Djennad sur ces terrains en est la preuve. Les niveaux aquifères se trouvent distribués régulièrement dans les bancs de grès médjanien. Par contre, le terrain crétacé et pauvre en eau, et les habitants de Flisset El-Bahr qui cultivent ce sol argilo-schisteux, s'alimentent aux sources des grès numidiens. Les poudingues oligocènes d'Abizar donnent également de nombreuses sources au tour desquelles se groupent les populations.

Le manque d'eau dans la vaste surface occupée par les marnes miocènes explique l'éloignement des villageois qui viennent se grouper en petit nombre au bord des petites plaines d'alluvion fournissant l'eau dans quelques puits, ou petites sources à la base des terrasses caillouteuses.

## **IV.2. LA PROBLEMATIQUE**

La population de Bouzguène s'accroît de plus en plus, d'où leur besoin en eau augmente et ainsi le déficit en eau. Dans le but de solutionner ce déficit, l'APC de Bouzguène était dans l'obligation de trouver d'autres sources. Vues les caractéristiques géologiques et topographiques de la région, les responsables ont pensé, en premier lieu, aux eaux souterraines. En second lieu, c'est de localiser la région qui abrite beaucoup de sources souterraines, et qui favorise parfaitement la réalisation d'un forage à vu l'aspect économique. Après une étude sur la région ils ont opté pour le village d'Ikoussa comme une place adéquate.

Après que le service technique d'hydraulique a décidé de réaliser un forage au niveau du village d'Ikoussa, les foreurs commencent leur travail où ils se trouvent devant une couche d'argile sec de 40 m, et en dépassant cette couche, et en entrant dans une couche de grès numidien l'eau commence à jaillir en surface avec un débit important, les foreurs ont continué à forer dans la couche de grès jusqu'à 52 m où ils s'étaient arrêtés et commencé le placement des crépines et le tubage pour le forage. Et après les analyses qui ont été faites sur l'eau de ce forage, il s'est avéré qu'elle contient le fer en excès qui dépasse les normes et la rend non potable. Les responsables et les habitants ont été très gênés par ces résultats. La population est demeurée avec son manque d'eau où l'eau ferrugineuse de forage jaillisse toujours dans la nature en lui causant des nuisances comme pour les habitants de village.

Après la réalisation de ce forage et comme il est artésien, on s'est trouvé devant le problème de manque d'eau qui reste toujours posé et le problème des nuisances qui seraient provoquées par l'eau de forage sur la nature. Alors nous sommes dans l'obligation de traiter cette eau, en passant par une étude sur les causes qui laissent cette eau ferrugineuse.

## **IV.3. ETUDE SUR LES CAUSES DE CONTAMINATION**

Pour l'étude sur les causes de la contamination de la nappe, on a adopté la démarche suivante :

### **IV.3.1. Type de la nappe**

Au cours de la réalisation du forage, l'eau reste absente jusqu'à 40 mètres de profondeur où l'eau commence à jaillir avec un débit important. L'absence de l'eau dans les



premiers 40 mètres et son jaillissement juste après cette profondeur avec une importante pression nous explique que la nappe est située en dessous d'un toit imperméable, avec une pente forte, donc notre nappe est captive inclinée.

➤ **Définition des nappes captives inclinées**

Les nappes situées entre deux couches imperméables sont dites captives car leur niveau ne peut monter, l'eau ne pouvant s'insinuer dans un sol imperméable, et on dit que la nappe est captive inclinée si elle est captive sous un toit imperméable incliné.

Ces nappes n'ont qu'un lien ténu avec la surface par où elles sont alimentées et qui correspond à la zone où la couche perméable affleure. De telles nappes se renouvellent donc plus lentement que les nappes libres. Elles sont en général profondes, et si leur pente est forte, l'eau y est sous pression. La pression est même parfois suffisante pour que le creusement d'un puits permette à l'eau de jaillir en surface : une telle nappe est alors dite artésienne.

**IV.3.2. Le forage**

Notre forage est arrêté à 52 mètres de profondeur où il a touché seulement 12 mètres de la couche perméable, sans atteindre le substratum, ce qui nous explique que le forage est imparfait.

➤ La coupe et le tubage de forage :

Le forage touche deux couches géologiques, avec 40 mètres dans la couche supérieure d'argile qui est imperméable, et 12 mètres dans la couche inférieure de grès numidien qui est perméable.

Pour le tubage du forage, un tubage plein en fonte de 0 à 40 mètres et un tubage crépiné de 40 à 52 mètres, et ce tubage était renforcé par un enrobage de gravier après du ciment de 0 à 40 mètres. Comme l'indique la figure (IV.3).

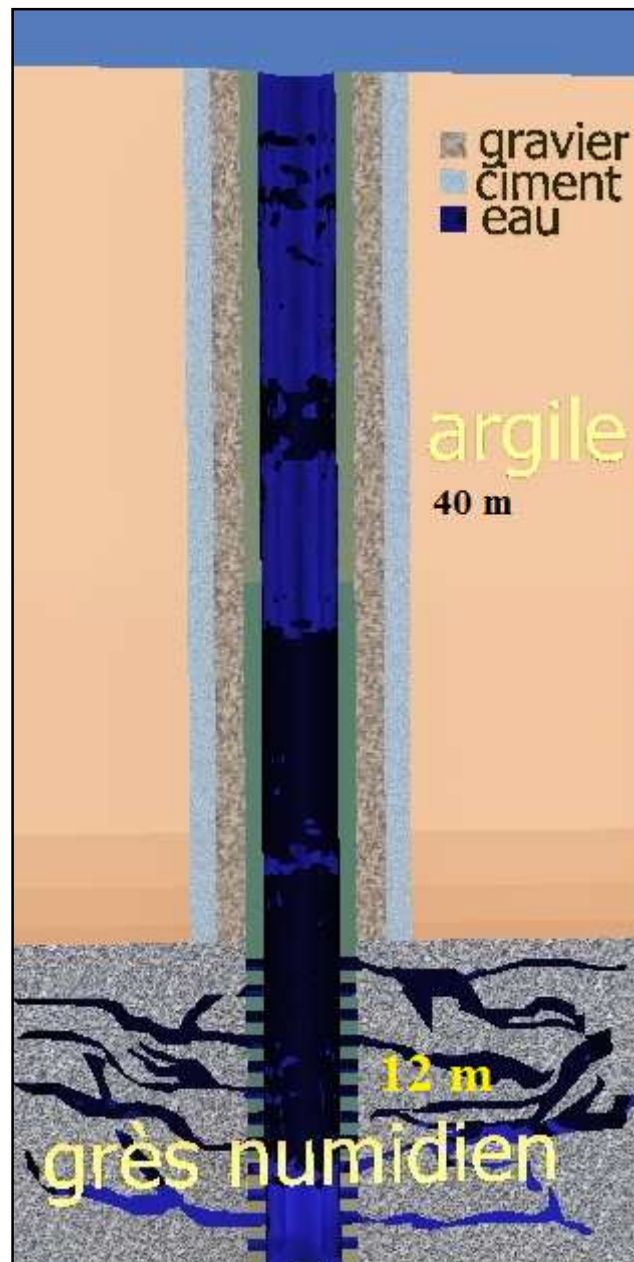


Figure IV.3 : Coupe verticale du forage

Et pour les calculs de débit, on regroupe deux formules, la formule limitante de Wenzel pour une nappe inclinée, et celle de Li, Bock et Benton pour un forage imparfait. Et dans le calcul, on applique la formule de Li, Bock et Benton en prenant la moyenne de rabattement selon le principe de Wenzel.

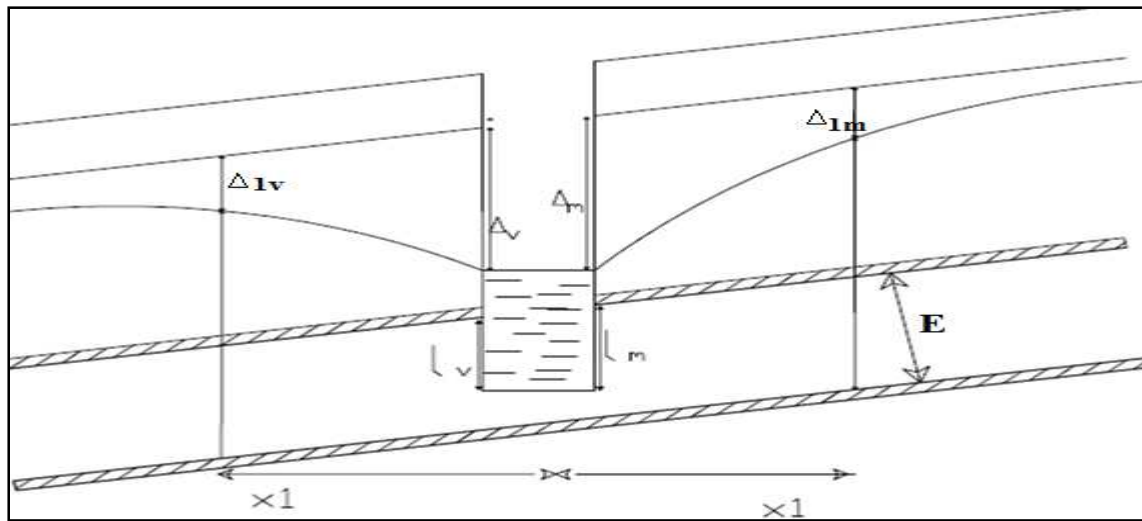


Figure IV.4 : Forage imparfait dans une nappe captive inclinée

On a d'après ces auteurs :

$$Q = 2\pi KE \frac{\Delta - \Delta'}{\log \frac{R}{r}}$$

$$\Delta = (\Delta_v + \Delta_m)/2$$

$$\text{En prenant : } A = (A_v + A_m)/2$$

Avec

$$A_v = \left[ \left( \frac{E}{l_v} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

$$A_m = \left[ \left( \frac{E}{l_m} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

Dans laquelle :

$$\Delta_{1v} = \frac{Q}{2\pi KE} \left[ \left( \frac{E}{l_v} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

$$\Delta_{1m} = \frac{Q}{2\pi KE} \left[ \left( \frac{E}{l_m} \right)^n - 1 \right] \log \frac{E}{r}$$

Donc

$$\Delta' = \frac{\Delta_{1v} + \Delta_{1m}}{2} = \frac{Q}{2\pi KE} \frac{[A_v + A_m]}{2} = \frac{Q}{2\pi KE} A$$

Ce qui, par conséquent, donne :

$$Q = \frac{2\pi KE \Delta}{\log \frac{R}{r} + A}$$

### IV.3.3. zone d'appel

Pour étudier la source de contamination de l'eau, la détermination et la délimitation de l'aquifère qui alimente le forage est très importante, car l'eau porte des informations sur la géologie de l'aquifère qui l'englobe. Le forage est artésien avec un débit constant, ce qui veut dire que la surface piézométrique inclinée.

Selon la formule générale de la zone d'appel citée dans le chapitre III et d'après la formule suivante du rayon d'appel  $R_0$  avec une pente de l'inclinaison de la nappe  $i$

$$R_0 = \frac{Q}{2\pi KE i}$$

On trouve que notre zone d'appel se trouve au-dessus de forage avec une petite partie qui se trouve au-dessous. Et notre zone d'appel limitée aussi par un front d'emprunt étroit.

Donc la zone d'étude pour ce cas est tout ce qui est au-dessus de la zone coupée par un plan horizontal passant par le point d'intersection entre le substratum et la verticale qui passe par le centre du fond du forage et en restant dans les limites de la zone d'appel.

En consultant la carte géologique de la région avec délimitation de la zone d'appel, on trouve une couche importante de l'argile qui atteint les 50 mètres d'épaisseur, sur une couche de grès numidien qui atteint jusqu'à 100 mètres d'épaisseur.

#### IV.3.4. Les facteurs qui favorisent la contamination selon notre géologie

La grandeur des surfaces de contact entre l'eau et les roches est aussi de premières importances. Ainsi, plus les couches aquifères meubles ont un grain fin, de même plus les couches aquifères consolidées ont de nombreuses diaclases ou chenaux, plus l'eau se concentrera rapidement en éléments chimiques. C'est ce qui explique la haute teneur, en générale des eaux des argiles et des sables argileux et la faible teneur des eaux des roches simplement fissurées. La grandeur des surfaces de contact est naturellement proportionnelle à la longueur du trajet des eaux souterraines. C'est pour quoi l'on constate généralement une augmentation de la concentration de l'eau de l'amont à l'aval de la nappe.

Il y a lieu enfin de remarquer que la vitesse de dissolution dans l'eau sera d'autant plus grande que l'eau est moins chargée en sels. En effet, selon la loi de Nernst, « la vitesse de dissolution d'un corps solide est proportionnelle au déficit de saturation ».

Ainsi, le temps de contact entre en jeu. Il est lui aussi un facteur primordial dans la concentration, d'importance égale, sinon supérieure à la grandeur des surfaces de contact. C'est aussi lui qui permet un accroissement de la concentration de l'amont à l'aval des nappes. Et c'est le temps qui confère aux eaux stagnantes leur haute teneur en sels, qui souvent les fait confondre avec les eaux connues.

Au bout d'un certain temps, on peut admettre que les eaux sont en équilibre avec les terrains qui les renferment.

L'eau des nappes provient des sols, sa composition sera donc proche de celles des solutions de sol. Les sols étant développés sur le même type de dépôt que les aquifères sous-jacents, la chimie des eaux évoluera peu du sol à l'aquifère. Les modifications majeures de la composition chimique des eaux proviennent de l'isolement progressif des solutions vis-à-vis de l'atmosphère. L'oxygène est présent dans l'air du sol, puis, lors de leur infiltration vers la nappe, les eaux ne sont plus au contact de l'air et il va donc de produire une transition progressive d'un milieu aérobie vers un milieu anaérobie. Cette évolution donne lieu une séquence de réactions dites d'oxydoréduction ou redox.

Dans notre cas une couche supérieure d'argile de 50 mètre favorise la mise en solution de fer, car l'argile contient souvent le fer, et a des particules très fines ne favorise pas une grande vitesse d'infiltration et donc le temps de contact sera prolongé, et cette affinité des

particules assure aussi une grande surface de contact entre l'eau et le sol. Et Comme l'indice de vide est très faible dans cette couche, l'eau n'est plus au contact avec l'air, ce qui la maintient dans un milieu anaérobie et ça ce qui explique que le fer est présent sous la forme  $Fe^{++}$ . Mais comme, on a aussi le fer qui n'est pas un élément lié à des roches très spécifiées et l'absence d'une loi générale qui localise le fer, il y a une possibilité que la couche de grès numidien le contient. Et pour cette couche, la grande distance entre le forage et la surface perméable affleurée assure un temps de parcours important qui est nécessaire pour le déroulement des réactions chimiques et la mise en solution de fer, et le milieu anaérobie reste assuré par la couche d'argile supérieure.

#### IV.4. LE TRAITEMENT

Le fer est l'un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Il est présent dans l'eau sous trois formes : le fer ferreux  $Fe^{2+}$ , le fer ferrique  $Fe^{3+}$  et le fer complexé à des matières organiques (acides humiques, tanniques, ...) et minérales (silicates, phosphates, ...). Dans les eaux bien aérées, le fer ferreux est oxydé en fer ferrique qui précipite sous forme d'hydroxyde,  $Fe(OH)_3$ . Dans les eaux souterraines, au contraire, l'absence d'oxygène fait que le fer reste en solution, et rend cette eau indésirable comme peut être toxique, s'il dépasse les normes.

##### IV.4.1. Avantages et inconvénients de la présence du fer dans les eaux

Le fer est un oligoélément indispensable, à l'état de trace, à la santé humaine. Le fer est vital pour les cellules, car il catalyse des réactions enzymatiques essentielles ; il est en outre indispensable à la respiration, puisqu'il fixe l'oxygène respiratoire à l'hémoglobine des globules rouges sanguins. Les déficits en fer entraînent des anémies marquées notamment par une oxygénation insuffisante des tissus. Mais au contraire, lorsqu'il se trouve en excès dans l'organisme, le fer devient toxique pour les cellules, en favorisant l'apparition des radicaux libres détruisant le foie, le cœur, ou encore le pancréas, comme dans l'hémochromatose héréditaire. Cette maladie génétique, qui est liée dans 80 % des cas à l'existence d'une mutation ponctuelle dans le gène Hfe-1, se caractérise par une hyper-absorption digestive de fer. Il s'agit d'une affection très fréquente dans les pays occidentaux, puisqu'elle touche une personne sur 300. En raison de l'absence d'un quelconque système physiologique capable

d'éliminer le fer, le seul moyen efficace pour en débarrasser les patients consiste à pratiquer des saignées, et ça plusieurs fois par semaine. De fait, une meilleure connaissance des mécanismes de régulation du fer est attendue depuis longtemps afin d'améliorer le traitement de ces maladies handicapantes.

La porte d'entrée du fer dans l'organisme est constituée par des cellules tapies dans les replis de l'intestin, les anthérocytes. Celles-ci reçoivent des signaux hormonaux les informant sur l'état des réserves internes et des besoins en fer, donnant par exemple l'ordre d'inhiber son absorption lorsqu'il est déjà en quantité suffisante dans l'organisme. Malgré des recherches intensives depuis 40 ans, aucune équipe n'était parvenue, jusqu'à présent, à identifier ces signaux.

C'est par hasard que Gaël Nicolas, Sophie Vaulont et leurs collaborateurs y sont parvenus grâce à une lignée de souris knock out. Ces animaux sont dépourvus d'un facteur de transcription, l'USF2 (Upstream Stimulatory Factor 2), supposé être impliqué dans le métabolisme du glucose. À la surprise des chercheurs, ces souris présentent en vieillissant un pancréas et un foie anormalement colorés en marron, signe d'un dépôt de fer, comme dans l'hémochromatose héréditaire ! Les explorations démontrent alors que ces souris souffrent bel et bien d'hémochromatose. Intrigués, ils établissent alors une banque soustractive d'ARN, permettant de voir si l'expression d'autres gènes est affectée chez leurs animaux transgéniques. C'est bien le cas ; l'un d'entre eux correspond à une séquence connue depuis peu, celle d'un peptide de 25 acides aminés ressemblant à une famille de peptides à action antimicrobienne appelés les défensines. De fait, ce peptide, qui est fabriqué dans le foie et secrété dans le sang, apparaît doté d'une certaine activité antimicrobienne et a été dénommé " hepcidine ". Mais pour Axel Kahn, Sophie Vaulont et leurs collègues de l'hôpital Bichat, l'hepcidine est probablement, et surtout, une véritable hormone qui agit sur les cellules intestinales pour inhiber l'absorption de fer : en son absence, le métal serait transféré sans limite dans la circulation sanguine.

Pour tester cette hypothèse, les biologistes parisiens multiplient les expériences. Ils vérifient d'abord que d'autres souris transgéniques sans USF2, provenant d'un autre laboratoire, et pourvues, quant à elles, d'un gène de l'hepcidine intact, n'ont pas de surcharge en fer. Ensuite, ils créent des souris transgéniques dont le foie surexprime l'hepcidine, pariant que celles-ci présenteraient une anémie. Les déficits s'avèrent plus graves que prévu :

l'écrasante majorité des animaux nouveau-nés, plus petits que la normale, dotés d'une peau très pâle, dépourvus de poils, effectivement anémiques avec des globules rouges déficients en hémoglobine, meurent au bout de quelques heures. Une injection de fer aux animaux permet leur survie. Quelques animaux qui produisent moins d'hepcidine sont moins sévèrement anémiques et survivent sans traitement.

Les perspectives diagnostiques et thérapeutiques ouvertes par cette découverte ont fait l'objet d'un dépôt de brevet. Elles offrent une nouvelle fenêtre sur les maladies de l'homéostasie du fer. A court terme, elles pourraient déboucher sur la mise au point d'un test diagnostique par dosage de l'hepcidine sérique. Quant aux retombées thérapeutiques à long terme, via notamment le développement d'agonistes et d'antagonistes de l'hepcidine, elles pourraient être considérables.

Non seulement l'excès du fer dans les eaux cause des nuisances sur la santé mais, on peut rencontrer aussi d'autres inconvénients comme :

- la neutralisation d'une partie des désinfectants due à l'oxydation du fer;
- la distribution d'une eau couleur rouille, esthétiquement peu engageante pour le consommateur, et qui peut tacher le linge et les sanitaires;
- le goût "métallique" procuré à l'eau;
- le risque de corrosion des canalisations dû au développement de micro-organismes (ferrobactéries).

#### **IV.4.2. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau du forage**

D'après les analyses qui ont été faites sur l'eau du forage, et d'après les normes qui ont été fixées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), on résulte le tableau de comparaison suivant :



**Tableau VI.1 : Analyse physico-chimiques**

PARAMETRES	UNITES	FORAGE	NORMES OMS
PH	/	6,21	6,5 à 8,5
Potentiel redox Eh	mV	264	/
Conductivité à 25°C	µs/cm	309	< 2800
Température	°C	17,7	<= 25
Turbidité	NTU	0,31	< 5
Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	00	<= 0,1
Nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0,0088	<= 50
Phosphate PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	0,012	<= 0,5
Calcium Ca <sup>++</sup>	mg/l	23,24	60
Magnésium Mg <sup>++</sup>	mg/l	9,23	10
Sodium Na <sup>+</sup>	mg/l	34	200
Potassium K <sup>+</sup>	mg/l	04	20
Chlorure Cl <sup>-</sup>	mg/l	12,9	< 250
Bicarbonate HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	180,56	30 à 500
Dureté total TH	mg/l CaCO <sub>3</sub>	96	< 250
Titre alcalin complet	mg/l CaCO <sub>3</sub>	148	< 150
Fer Fe <sup>++</sup>	mg/l	4,18	0.3

**Interprétation des résultats :**

D'après le tableau, tous les paramètres de notre eau répondent aux normes fixées par l'OMS, sauf le fer qui dépasse la barre. Et le pH qui sort de son domaine d'équilibre.

**Le pH**

Le pH est une mesure de l'activité des ions d'hydrogène (H<sup>+</sup>) contenus dans l'eau. Il correspond au logarithme de la concentration des ions H<sup>+</sup>. L'échelle du pH varie entre 0 et 14, soit une forte acidité (0) et une base forte (14). Une eau légèrement acide sera entre 6,5 et 7. Une eau légèrement alcaline sera entre 7,2 et 8,3. La valeur du pH donne donc une idée de son alcalinité et de sa teneur en CO<sub>2</sub>. Il faut toutefois faire attention, une eau qui a un pH de 7 peut être agressive si la dureté et l'alcalinité sont faibles. Et pour notre cas le pH sort de domaine de la neutralité (< 6,5) donc l'eau est acide.

**Le fer :**

Le fer est souvent présent dans l'eau et ce, en quantité variable selon les régions et la provenance de l'eau. Au-delà de la norme prescrite, cette composante peut être toxique, comme dans notre cas où la présence de fer est en excès et dépasse les normes. Ce qui oblige de faire un traitement pour rendre cette eau potable et réponde aux normes fixées par l'OMS.

**IV.4.3. Les procédés préconisés pour la déferrisation**

La construction de ces unités de déferrisation répond à un souci d'amélioration de la qualité de l'eau des forages en éliminant notamment le fer. Un taux élevé de fer dans l'eau est nuisible et peut être à l'origine de l'abandon pur et simple du forage à cause des désagréments engendrés. Il existe plusieurs procédés qui sont utilisés selon les cas.

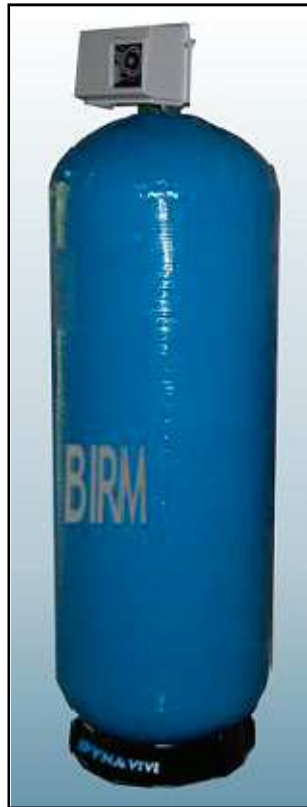
**VI.4.3.1. Procédé du BIRM**

L'action Déferrisante maximale du BIRM est effective pour des pH d'eau compris entre 6,8 à 9. L'acidité de l'eau est donc capitale pour l'efficacité du filtre déferriseur. Si ce pH s'avère trop bas (< 6,8 à 7), il est nécessaire de le remonter avant la déferrisation. On réalise cela simplement par filtration préalable de l'eau sur une Calcite de remontée pH (i.e. un Marbre Blanc concassé et calibré).

a) Le Déferriseur :

- Le filtre Déferriseur ainsi constitué est sans entretien ni maintenance particulière pendant toute la durée de vie du média BIRM. Il ne rejette aucun effluent « polluant » ou toxique. Les oxydes de fer précipités et retenus au sein du filtre doivent simplement être éliminés régulièrement par rétro-lavage du média à flux d'eau inverse : Ces eaux de rejet peuvent parfaitement être mises à l'égout.
- Ces cycles de rinçage et détassage du média sont assurés automatiquement par une vanne chronométrique montée en tête de filtre. Celle-ci gère tous les flux d'eau au sein du filtre selon trois cycles principaux : Service (filtration), Brassage, Rétro-lavage.
- Le dimensionnement du filtre et sa charge en média BIRM sont à déterminer principalement en fonction du débit à traiter et des taux initiaux de Fer à éliminer.

Dans la mesure du possible, nous préconisons donc systématiquement l'usage d'un sable «fabriqué » de type BIRM car il offre l'énorme avantage de ne pas nécessiter de régénération chimique régulière.



*Figure VI.5 : Déferriseur*

b) La Vanne de gestion du filtre :

- Cette vanne est montée en tête du filtre et gère automatiquement les flux d'eau en son sein. Dans la mesure du possible, nous préconisons toujours une vanne de conception électromécanique plutôt qu'électronique intégrale.

Cette conception électromécanique pourrait être qualifiée de « rustique » (programmation à aiguilles) mais sa fiabilité et sa solidité en usages professionnels n'est plus à prouver et est largement reconnue.

- Programmable mécaniquement sur 12 jours, la vanne va piloter automatiquement les cycles de rétro-lavages du média filtrant, nécessaires pour le détasser et le débarrasser à flux d'eau inverse des matières filtrées et accumulées, avant colmatage.

Ces eaux de rinçage, très riches en oxydes de fer, sont destinées à être rejetées (prévoir au montage un drain de rejet aux eaux usées).



*Figure VI.6 : Vanne électromécanique*

- Au plein débit de pompe, ces rétro-lavages réguliers doivent avoir lieu « à pleine eau perdue », à contre-courant, pendant 20 à 30 minutes en moyenne, et le filtre est coupé en sortie pendant cette opération : La continuité de service n'est donc plus assurée, mais ceci n'a rien de pénalisant en usage courant si on planifie correctement ces cycles (nuit ou heures creuses).

c) La Bombonne et les Médias filtrants :

La bouteille est généralement construite en résine armée de qualité alimentaire, avec embase. Elle doit être dimensionnée pour filtrer correctement le débit concerné, tout en privilégiant une filtration lente et efficace en usage normal (débits intermittents ou faibles).

Cette bombonne est chargée jusqu'à environ mi-hauteur en média BIRM sur un petit lit inférieur de sable-silex de filtration.

d) L'installation du Filtre :

Cette installation est relativement facile puisqu'il ne s'agit que d'un simple raccordement entré/sortie à une canalisation. Elle ne présente pas de difficulté majeure :

- Installation sur sol plan et supportant la charge.

- Installation dans un local propre et « hors-gel », d'accès facile.
- Une Installation « derrière » un bac tampon à pression (aval hydraulique) est conseillée pour garantir une pression stable (éviter les à-coups de démarrage de pompe) et toujours positive dans le filtre (éviter les dépressions préjudiciables à l'intégrité de la bombonne).
- Si ce n'est pas le cas (montage directement en « sortie » de pompe de forage), il faut alors impérativement prévoir une électrovanne de coupure en entrée du filtre, pilotée par le déclenchement de la pompe, afin de prévenir le siphonage éventuel du filtre par la colonne d'eau du forage (si défaillance du clapet anti-retour de la pompe)
- Prévoir un drain de rejet aux eaux usées pour l'évacuation des eaux de rinçage.

La seule intervention initiale, pendant la période de mise en route, consiste à déterminer au mieux la fréquence et la longueur des cycles de rétro-lavage/détassage du filtre permettant son efficacité maximale, avant colmatage (baisse significative du débit) ou remontée du taux de Fer dans l'eau. Nous assurons évidemment un pré-réglage « moyen » de la vanne, compte tenu du contexte d'exploitation du filtre.

Une fois ce cycle déterminé au mieux et géré automatiquement par la vanne programmée, le filtre ne nécessite plus aucun entretien particulier jusqu'à l'épuisement du sable BIRM (6 à 8 ans), nécessitant alors son renouvellement complet.

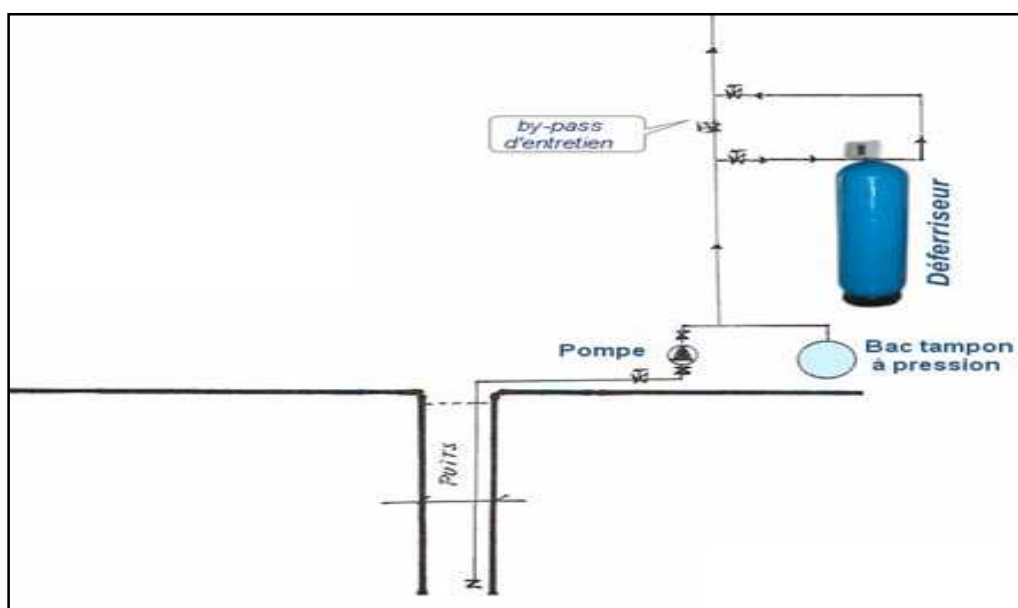


Figure VI.7 : Schéma de principe pour l'installation

#### VI.4.3.2. Le procédé bi 'eau

##### a) Rechercher les bénéfices des processus naturels

- La filtration sur berges élimine les matières en suspension, les micro-organismes, la plupart des métaux lourds, les nitrates (en conditions d'anaérobiose) mais génère du fer, manganèse et ammonium ( $\text{NH}_4$ )
- Les gravières peuvent éliminer l'azote ( $\text{NH}_4/\text{NO}_3$ )
- Les bassins d'infiltration avec aération retiennent le fer, le manganèse, oxydent  $\text{NH}_4$  (processus biologique)
- Les aquifères peuvent stocker l'eau pendant plusieurs mois
- La filtration sur berges peut fournir de grandes quantités d'eau

##### b) Présentation

- Le procédé Bi'Eau est un procédé innovant développé par Lyonnaise des Eaux et le CIRSEE –il a fait l'objet d'un dépôt de brevet.
- Il vise à améliorer la qualité des eaux brutes grâce à la multiplication des étapes de filtration naturelle.
- Il permet un usage indirect et sécurisé des eaux de surface et permet de gérer le stockage des eaux souterraines.
- Le principe du procédé est d'associer deux systèmes souterrains en série, afin de rechercher un certain nombre d'avantages dans l'amélioration de la qualité de l'eau finale arrivant à l'usine de traitement :

Un système de prélèvement en nappe en milieu réducteur qui bénéficie d'une alimentation suffisante à partir des infiltrations d'un cours d'eau (forage en filtration sur berge ou gravière en lien avec une rivière)

Suivi d'un système de réalimentation artificielle en milieu oxydant (bassin de surface ou gravière)

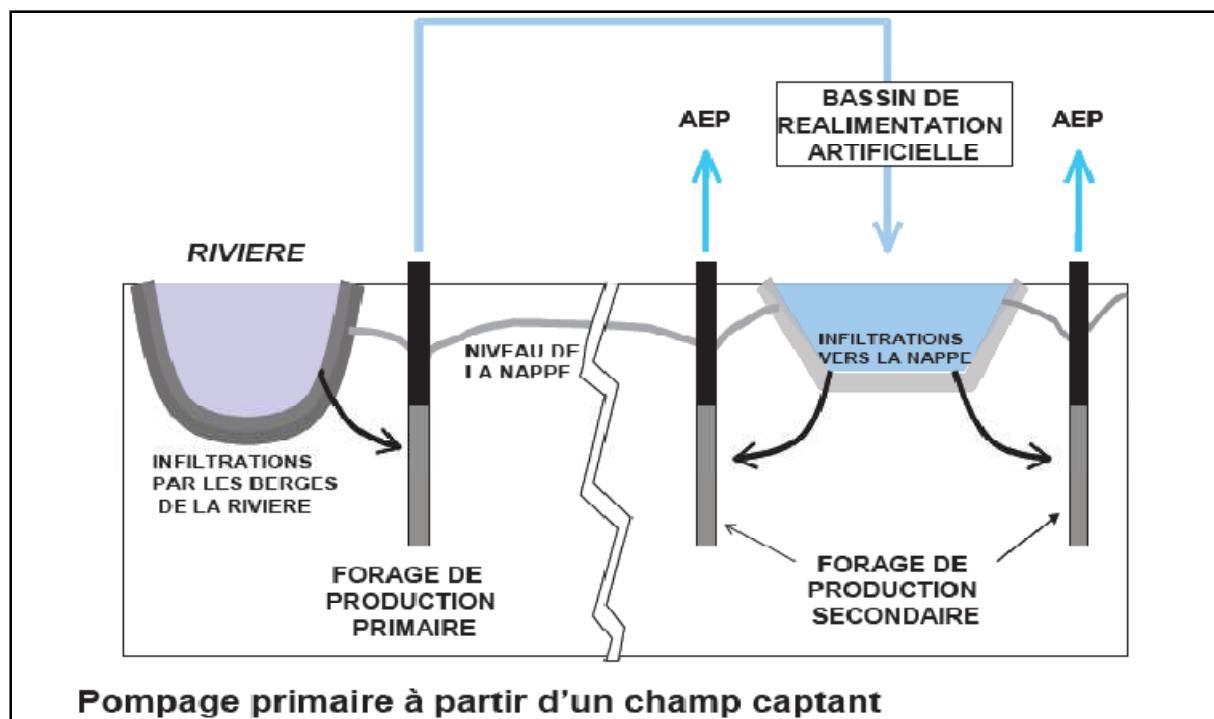


Figure VI.8 : Schéma du procédé Bi' Eau N°1

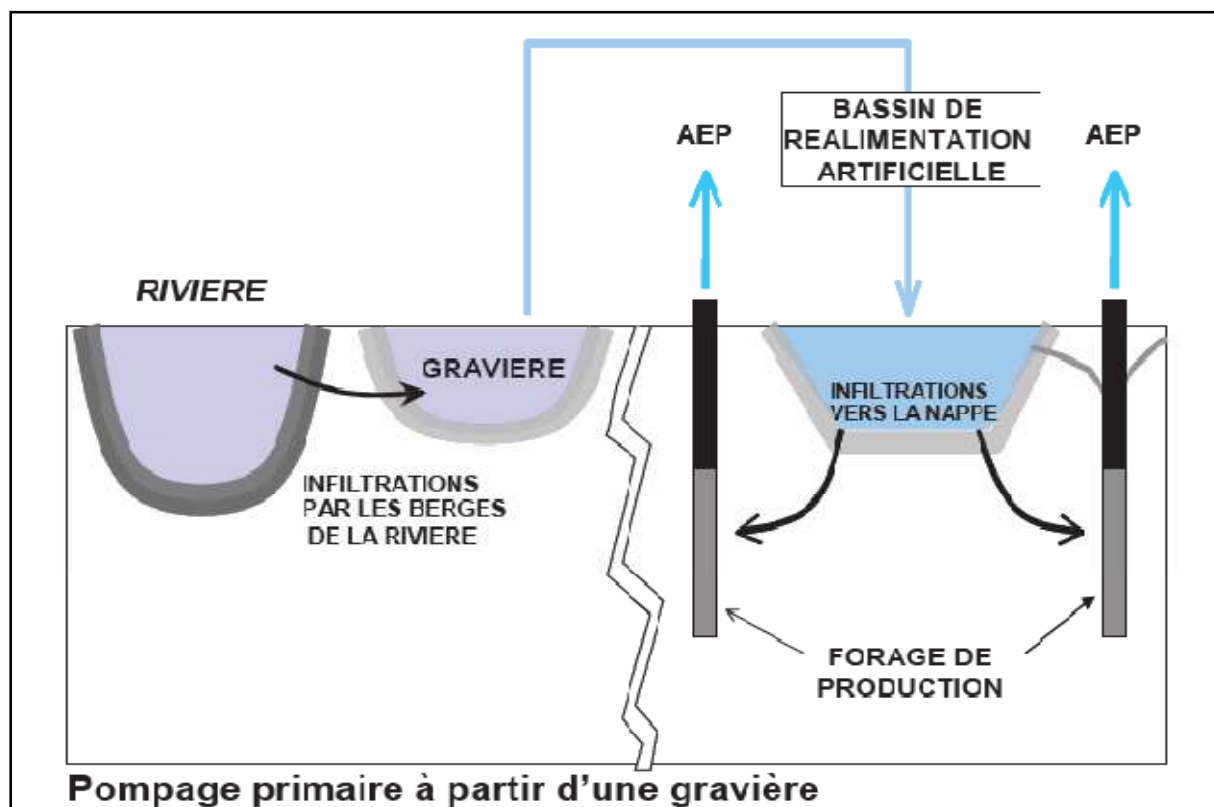


Figure VI.9 : Schéma du procédé Bi' Eau N°2

c) Les avantages du procédé Bi 'Eau

⇒ La plupart des composés gênants qui compliquent habituellement les chaînes de traitement et génèrent des boues sont évités (MES, fer, manganèse).

⇒ Le procédé s'apparente à une véritable usine naturelle du traitement de l'eau.

⇒ Il permet d'obtenir une qualité d'eau élevée pour un coût économique faible

⇒ Le procédé apporte par ailleurs des garanties fortes sur la qualité microbiologiques des eaux. Cette double barrière redox joue également un rôle important dans l'élimination de certains polluants (nitrates, métaux, pesticides, médicaments...).

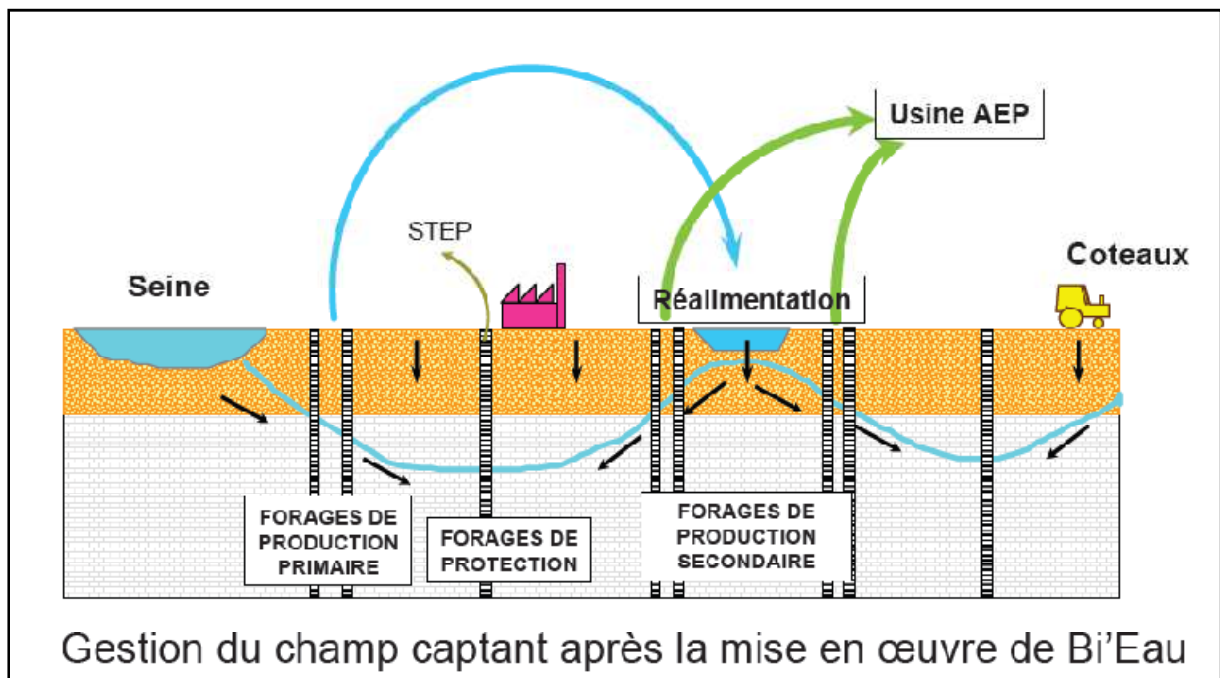
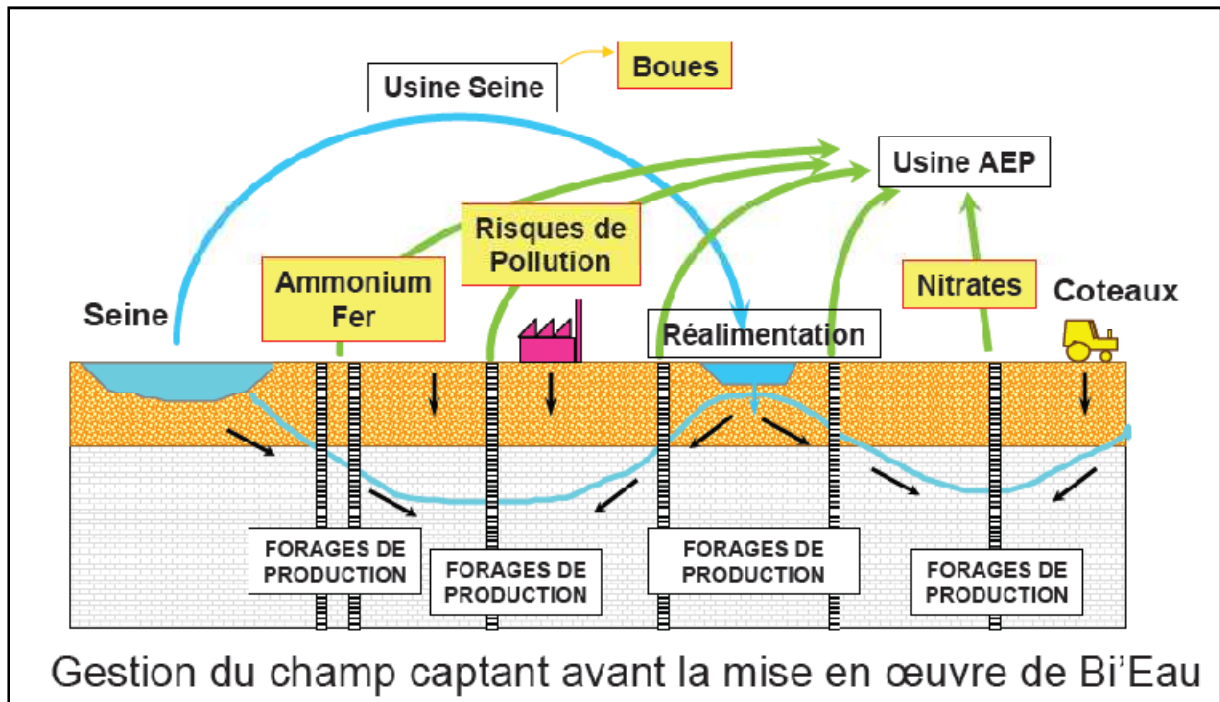
• Les clés du caractère innovant du procédé Bi 'Eau :

- ❖ Faire circuler et filtrer l'eau dans un environnement où des processus de filtration naturelle ont lieu
- ❖ Combiner deux ou plusieurs étapes avec des interfaces biologiques actives dans des conditions soit oxydantes soit réductrices pour :
  - ✓ Eliminer les étapes de décantation, nitrification
  - ✓ Réduire la production de boues

• Il nécessite une étude des sites pour :

- ❖ Identifier les processus de traitement naturels présents dans l'environnement
- ❖ Comprendre les écoulements souterrains.





### VI.4.3.3. Unité de déferrisation

Il ya deux catégories d'unités : le type A.D.F. (Aération - Décantation - Filtration) et celui dit A.F. (Aération - Filtration). L'utilisation de l'une ou l'autre est fonction de la teneur en fer total. Le premier type est fait en parpaings et le second confectionné avec des fûts métalliques. Ces deux procédés d'élimination du fer sont exempts de toute utilisation de produits chimiques.

#### a) Fonctionnement de l'unité de déferrisation

Le principe de fonctionnement de l'unité de déferrisation repose essentiellement sur les propriétés chimiques du fer dans l'eau d'une part et d'autre part, sur les caractéristiques physiques des granulats utilisés pour le traitement.

Il est à remarquer que le fonctionnement de cette unité ne nécessite pas l'utilisation de réactifs chimiques pendant le processus de traitement.

Le fer dissous est présent sous forme de fer ferreux. Il suffit de l'oxyder en fer ferrique pour qu'il précipite. Cette oxydation est possible en réalisant une simple aération, selon la réaction suivante :



Et les étapes de traitement pour ces unités sont :

#### a.1) L'aération

Basée sur l'oxydation du fer divalent par l'oxygène de l'air, l'aération constitue le premier stade du traitement de déferrisation. La présence du gravier quartz grossier dans la zone d'aération a pour but d'allonger le trajet des filets liquides et par conséquent le temps de brassage de l'eau par l'air. Elle consiste à dissoudre l'oxygène de l'air dans l'eau et s'effectue à la pression atmosphérique; ce qui offre l'avantage d'évacuer à moindre frais le gaz carbonique agressif dont l'enlèvement aurait nécessité un traitement de neutralisation coûteux lorsque sa teneur est élevée. De plus, l'aération permet l'élimination de l'hydrogène sulfureux ( $\text{H}_2\text{S}$ ). La rapidité de l'oxydation du fer divalent par l'oxygène dépend de plusieurs facteurs et en particulier de la température, du potentiel d'oxydoréduction, du pH, de la teneur en fer et en oxygène dissous.

a.2) La décantation

La décantation précède la filtration mais suit l'aération. L'aération de l'eau brute chargée en fer produit un volume important de précipité, tout comme lorsque le traitement de l'eau implique l'adjonction de coagulants. L'unité de déferrisation comporte un bassin de décantation à l'intérieur duquel se produit non pas une décantation en piston (généralement observée par des concentrations élevées des floccs qui créent une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant), mais plutôt une décantation diffuse (se traduisant par une augmentation de la vitesse de chute au fur et à mesure que les dimensions des floccs s'accroissent à la rencontre avec d'autres particules).

a.3) La filtration

Elle termine le processus de traitement de déferrisation. C'est un procédé de séparation physique utilisant le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat). Ce qui entraîne la formation d'un dépôt de solides à la surface et à l'intérieur du filtre selon les caractéristiques granulométriques du matériau filtrant, la grosseur et la cohésion des solides en suspension. Ces dépôts entraînent le colmatage du filtre nécessitant ainsi un nettoyage plus ou moins fréquent.

#### **IV.4.4. Critique des trois procédés et le choix de la technique adéquate**

Pour le procédé du BIRM, le débit traité est très limité car la bombonne pour qu'elle soit efficace en usage et avoir une durée de vie prolongée, il faut que les débits soient faibles.

Pour le procédé BI'EAU, c'est un traitement purement naturel, et moins coûteux mais pour notre cas le sol, qui est de l'argile ne favorise pas la réinjection de l'eau car l'argile est imperméable.

Pour l'unité de déferrisation : le dimensionnement se fait selon le débit voulu donc cette technique est applicable sur toutes les échelles de débit, et car le traitement est naturel, le procédé devient non coûteux, avec facilité de maintenance et efficacité d'élimination de fer.

Pour notre traitement, on opte pour la dernière technique, unité de déferrisation, car ses organes seront déterminés selon la qualité de l'eau. Si le pH est adéquat pour une oxydation rapide de fer à l'air libre on opte pour une station qui assure l'aération, décantation, filtration. Et si le pH n'est pas adéquat on opte pour station qui modifie le pH et assure au même temps l'aération, la décantation et la filtration. Et le choix de cette station revient aussi à son efficacité, et car elle n'est pas coûteuse et que les conditions nécessaires pour la conception de cette station de déferrisation sont aisément assurées.

#### IV.4.5. Conception de la station de traitement

la station de déferrisation sert à éliminer le fer par oxydation de fer ferreux en fer ferrique à l'air libre et assurer une décantation de l'hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Et pour que la station soit efficace et avoir une décantation de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , on doit vérifier et régler le pH qui favorise l'oxydation rapide et nous mène vers le domaine de précipitation d'hydroxyde de fer.

##### a) Le domaine de précipitation

Les domaines de précipitations sont en fonction des différentes valeurs de Eh, en fonction du pH et de  $\text{HCO}_3^-$  Et la figure suivante montre notre domaine de précipitation.

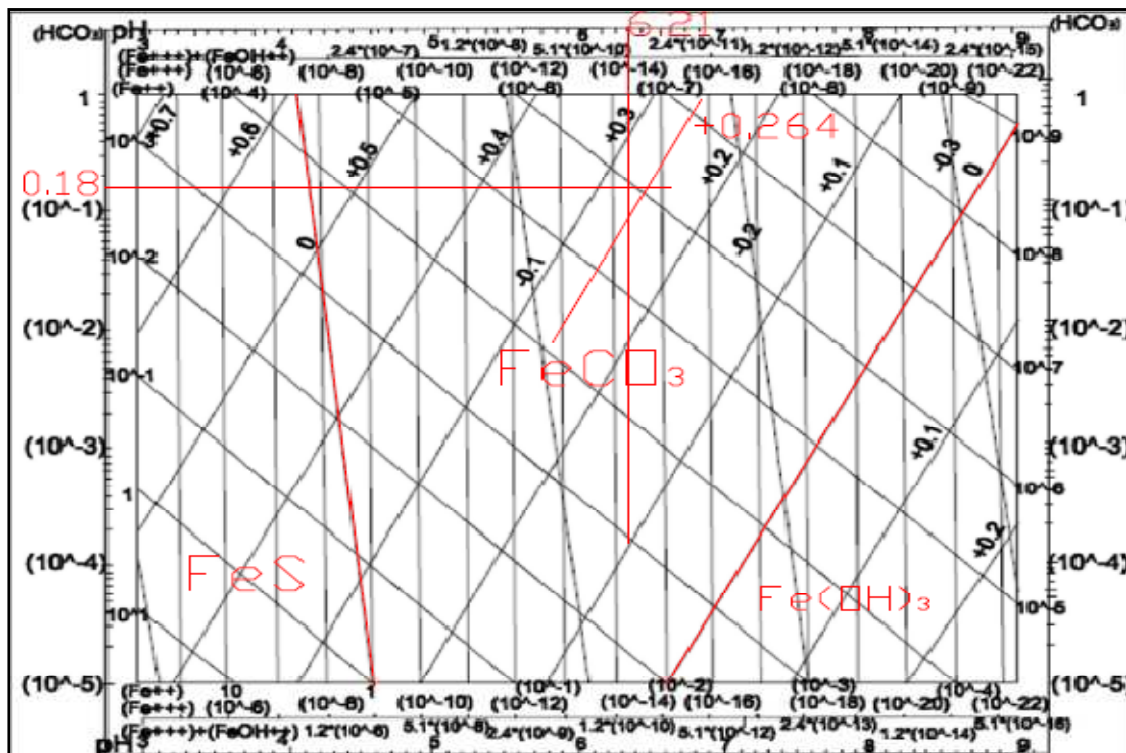
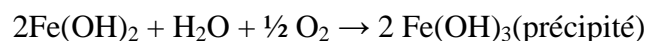
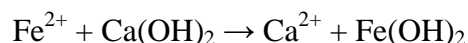


Figure VI.10 : Diagramme  $[\text{HCO}_3^-]$  – pH des champs de précipitation de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{FeCO}_3$  et de  $\text{FeS}$ , et teneur maxima en  $[\text{Fe}^{++}]$ ,  $[\text{Fe}^{+++}]$  et  $[\text{FeOH}^{++}]$  dans chacun de ces champs.

D'après la figure VI.10, le domaine de précipitation est le domaine de  $\text{FeCO}_3$  et pour basculer vers le domaine de précipitation de  $\text{Fe(OH)}_3$ , on doit augmenter le pH par décarbonatation à la chaux. Et l'élévation du pH entraînera la précipitation du fer dissous, suivant les réactions suivantes :



#### a) Cinétique d'oxydation

La vitesse d'oxydation est favorisée par l'augmentation du pH. A titre de comparaison, le tableau ci-après montre que l'oxydation du fer est généralement rapide pour un  $\text{pH} > 7$

**Tableau VI.2 : temps d'oxydation en fonction du pH**

pH	Temps d'oxydation
< 7	2 heures
> 7,5	1/4 d'heure

D'après le tableau ci-dessus on voit l'obligation d'augmenter le pH ( $\text{pH} > 7,5$ ) par circulation sur la chaux où sur le marbre concassé, pour avoir une oxydation rapide, aération à l'air libre efficace, qui nous laisse concevoir la station de déferrisation avec un dimensionnement raisonnable.

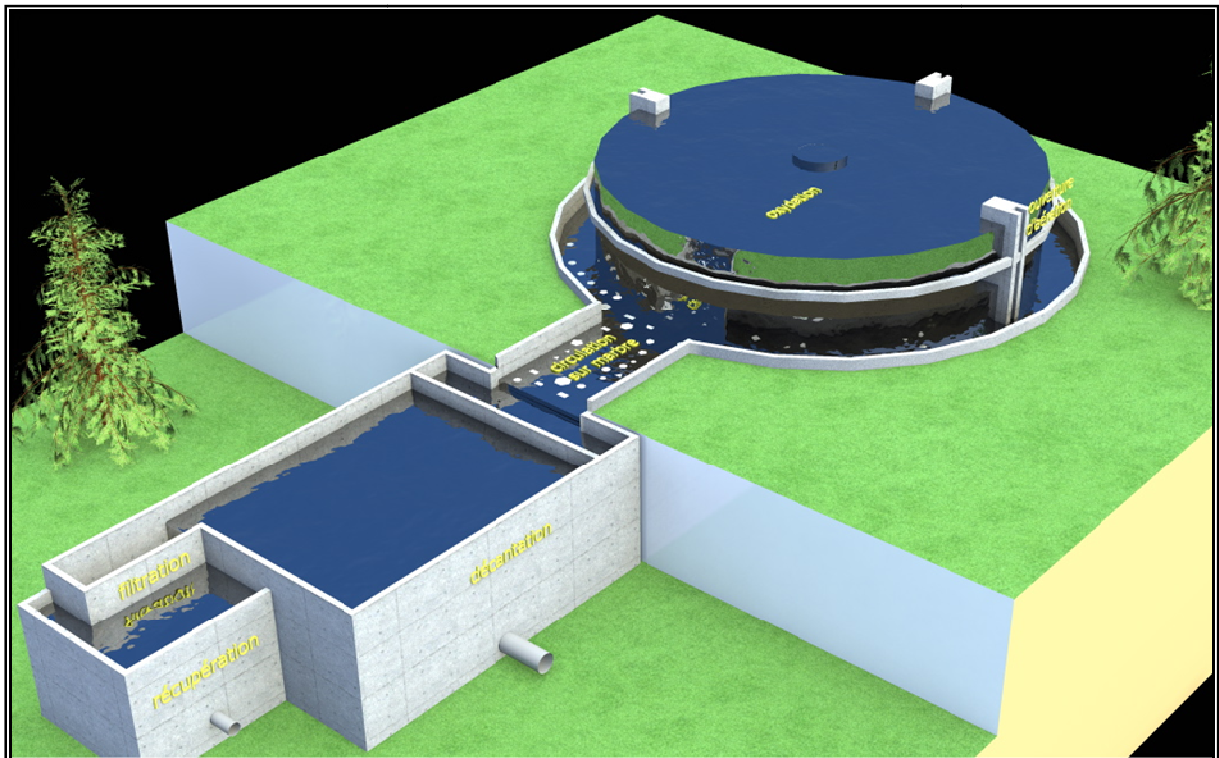
- après avoir des conditions défavorables à l'oxydation rapide et à la décantation d'hydroxyde de fer, la circulation sur la chaux où sur le marbre concassé est une étape très importante pour régler le pH et rendre l'unité de déferrisation efficace. Et c'est pour cela qu'on doit concevoir une station avec circulation sur le marbre concassé.

Et donc la station de déferrisation, doit assurer les étapes suivantes et comme le montre la figure (VI.11) :

- l'aération : circulation en lame mince sur trois dalles rondes.

- circulation sur le marbre concassé où sur la chaux.

- bassin stabilisateur d'écoulement.
- bassin de décantation.
- bassin de filtration.
- bassin de récupération.



**Figure VI.11** : station de déferrisation

#### IV.4.5.1. Aération

Cette étape constitue dans tous les cas le premier stade du traitement ; indépendamment de l'oxydation du fer et, elle permet également l'élimination éventuelle de H<sub>2</sub>S, adoucir le goût et l'odeur et d'apporter l'oxygène nécessaire à la nitrification éventuelle de l'ammonium et à l'oxydation de fer.

- La réaction d'oxydation du fer par l'oxygène de l'air (ou pur) peut s'écrire :

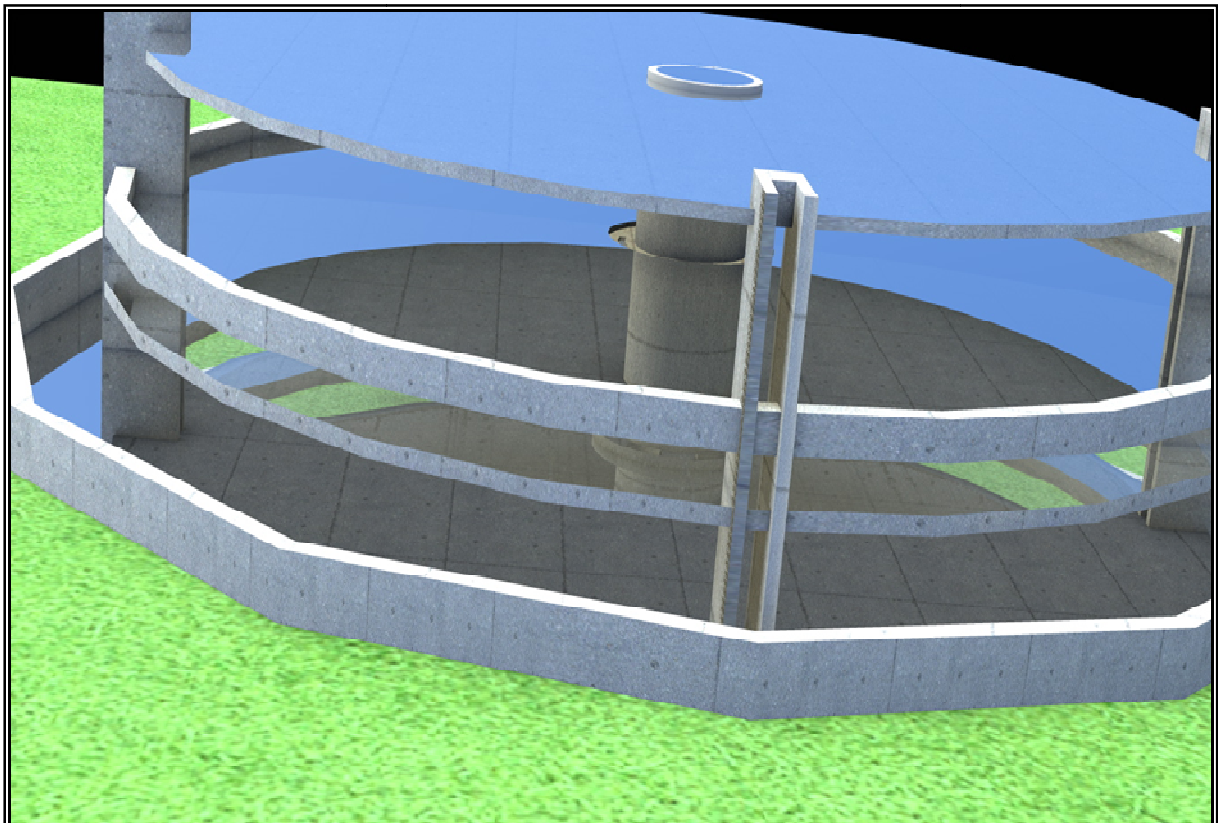




La stœchiométrie de la réaction (1) montre qu'il faut 0,14 mg de  $O_2$  pour oxyder 1 mg de  $Fe^{++}$  correspondant à une production de 1,92 mg de  $Fe(OH)_3$ .

#### a) Techniques d'aération

L'aération ne demande pas à être très poussée puisqu'il ne faut que 0.14 mg d' $O_2$  pour oxyder 1 mg de  $Fe^{++}$ . Cette aération peut être assurée en ruisselant l'eau en lame mince sur trois dalles rondes superposées et naturellement aérées, La circulation sur les dalles sera suite d'une chute d'un étage à l'autre. Les deux dalles inférieures seront airées par des ouvertures aménagées au niveau des poteaux qui portent les dalles, comme le montre les deux figures, figure (VI.12) et figure (VI.13).



**Figure VI.12** : Les dalles d'oxydation

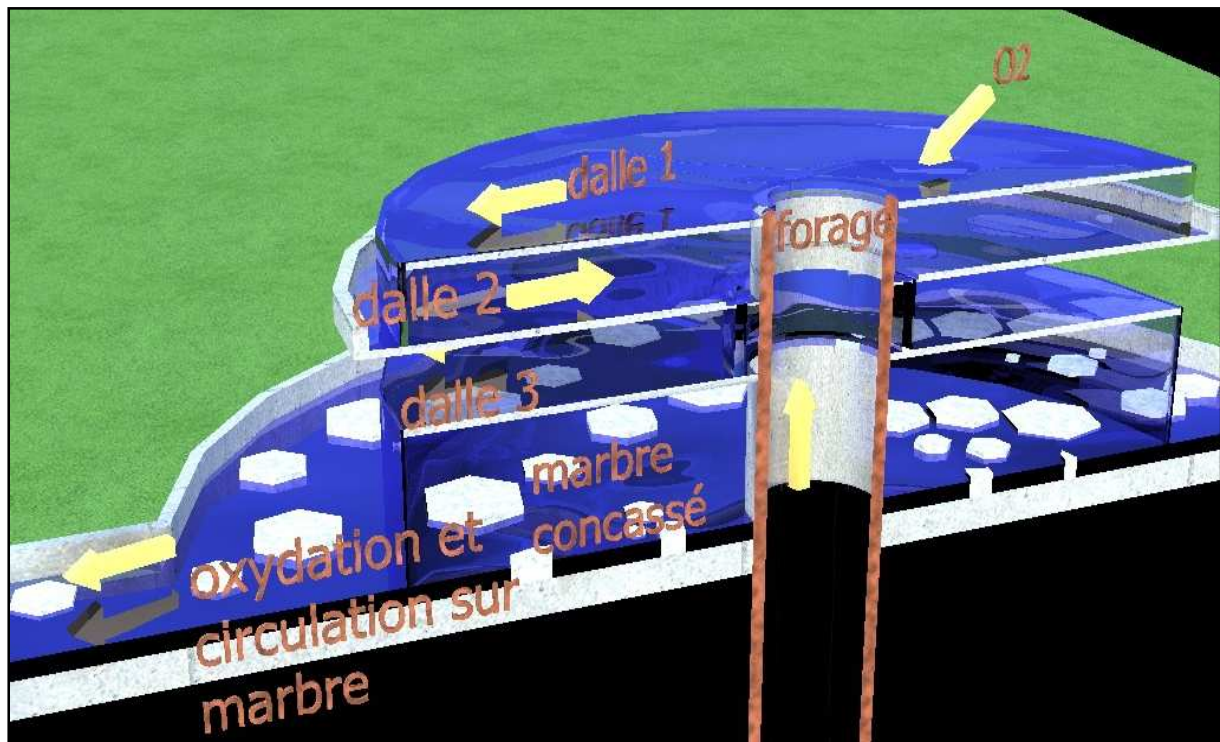


Figure VI.13 : Coupes verticale des dalles d'oxydation

#### b) Dimensionnement

Le dimensionnement des dalles sera de la manière, où la lame ruisselée sera mince pour assurer une bonne aération.

-Calcul d'oxygène nécessaire pour oxyder le fer que contient 1litres d'eau de forage

Selon les analyses l'eau du forage contient 4.18 mg/l, et on a 0.14mg d'O<sub>2</sub> pour oxyder 1 mg de Fe<sup>++</sup>.

Donc

La quantité d'O<sub>2</sub> nécessaire pour 1 m<sup>3</sup> =  $4.18 \times 0.14 \times 1000 = 585.2$  mg d'O<sub>2</sub>.

Or, 1m<sup>3</sup> d'air contient 285,7g d'oxygène

Il faut donc  $585.2 / 285.7 = 2.04$  m<sup>3</sup> d'air pour oxyder le fer de 1 m<sup>3</sup> d'eau

On suppose que la lame ruisselée est de 3 mm, et pour avoir un temps de parcours d'une minute sur chaque dalle, donc pour calculer le Rayon de la dalle R on a :



Q : le débit soutiré de forage.

$V_1$  : volume d'eau soutiré pour une 1 minute.

l : la hauteur de la lame ruisselée.

R : rayon de la dalle.

$$V_1 = \pi R^2 l.$$

$$Q = 1.6 \text{ l/s} = 0.0016 \text{ m}^3/\text{s}.$$

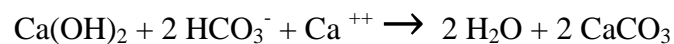
$$V_1 = 0.0016 * 60 = 0.096 \text{ m}^3.$$

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot l}} = \sqrt{\frac{0.096}{3.14 * 0.03}} = 3.20 \text{ m}$$

Donc le rayon de chaque dalle est égale à 3.2 mètres et ces dalles peuvent assurer une circulation de 3 à 4 minutes en lame mince de 3 millimètres.

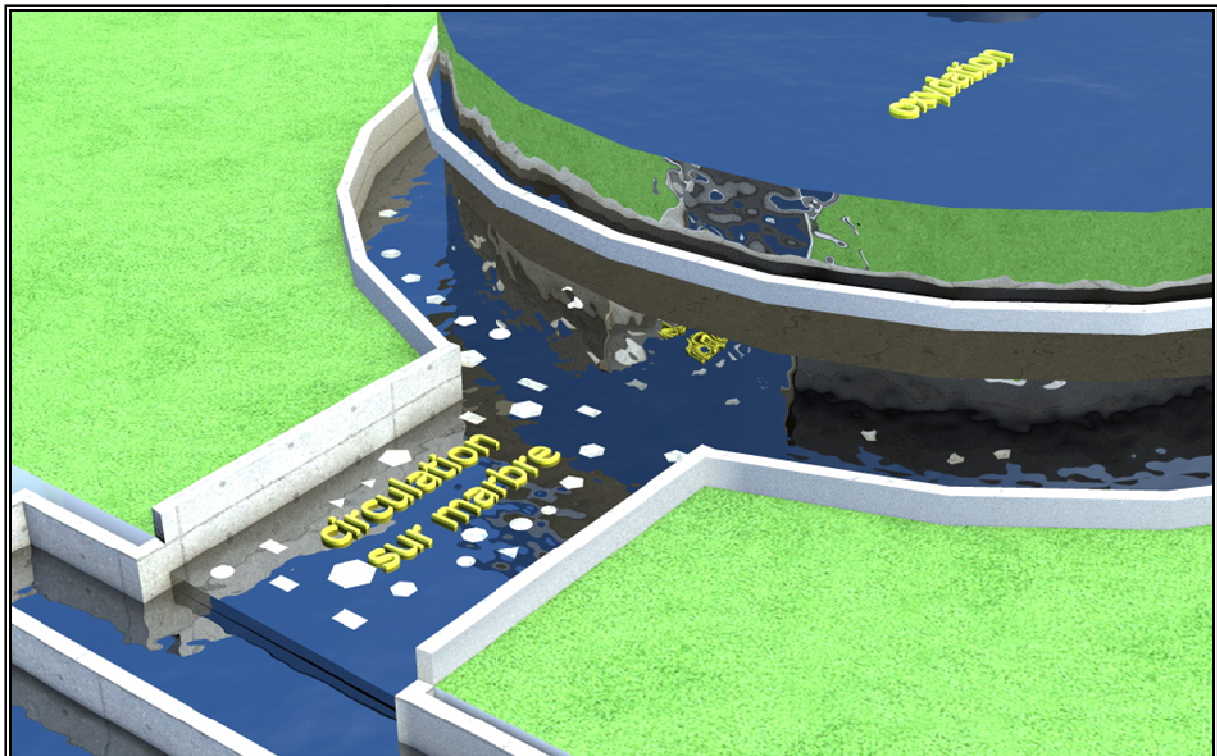
#### VI.4.5.2. Circulation sur le marbre blanc concassé (Décarbonatation)

La circulation de l'eau après aération sur le marbre blanc concassé  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  provoque la précipitation des bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  en carbonate de calcium (  $\text{CaCO}_3$  ) selon la réaction suivante.



Ainsi la précipitation des bicarbonates entraine l'augmentation de pH et le basculement vers le domaine de précipitation d'hydroxyde de fer.

Cette opération est réalisée au dessous des trois dalles d'aération, dans un bassin contenant le marbre concassé avec une épaisseur de 20 centimètre, où l'eau circule en contacte avec le marbre dans ce bassin (voir figure (VI.14)).



**Figure VI.14 :** Circulation sur le marbre

#### **VI.4.5.3. Bassin stabilisateur**

C'est un bassin qui suit le bassin qui contient le marbre et avant le bassin de décantation, il sert à stabiliser l'écoulement, et permet que l'alimentation de bassin de décantation soit par un passage qui se trouve au fond, et pour assurer les conditions qui favorisent une décantation statique.

#### **VI.4.5.4. Bassin de décantation**

La conception technique des installations exige de savoir si la décantation est nécessaire après aération, passage sur un lit de contact catalyseur ou traitement chimique de l'eau avant filtration. On recourt habituellement à la décantation pour abaisser le coût de la filtration lorsque le traitement à la chaux s'impose ou que la teneur en fer de l'eau brute dépasse 2,0 mg.

Les temps de sédimentation doivent être déterminés dans chaque cas d'espèce ; pour l'élimination du fer, ils sont généralement compris entre 1 et 2 heures et peut être allé jusqu'à 4 heures.

Le bassin de décantation est conçu de la manière, où il assure une décantation statique, d'hydroxyde de fer et de carbonate de calcium. C'est-à-dire l'eau rentre par le fond et après le temps de séjour déborde par surverse vers le bassin de filtration. Cette technique favorise pour que les particules se décantent rapidement car la vitesse au fond sera très faible et donc il n'y a pas de force qui les entraîne, alors la décantation sera rapide, et le bassin efficace. Figure (VI.15).

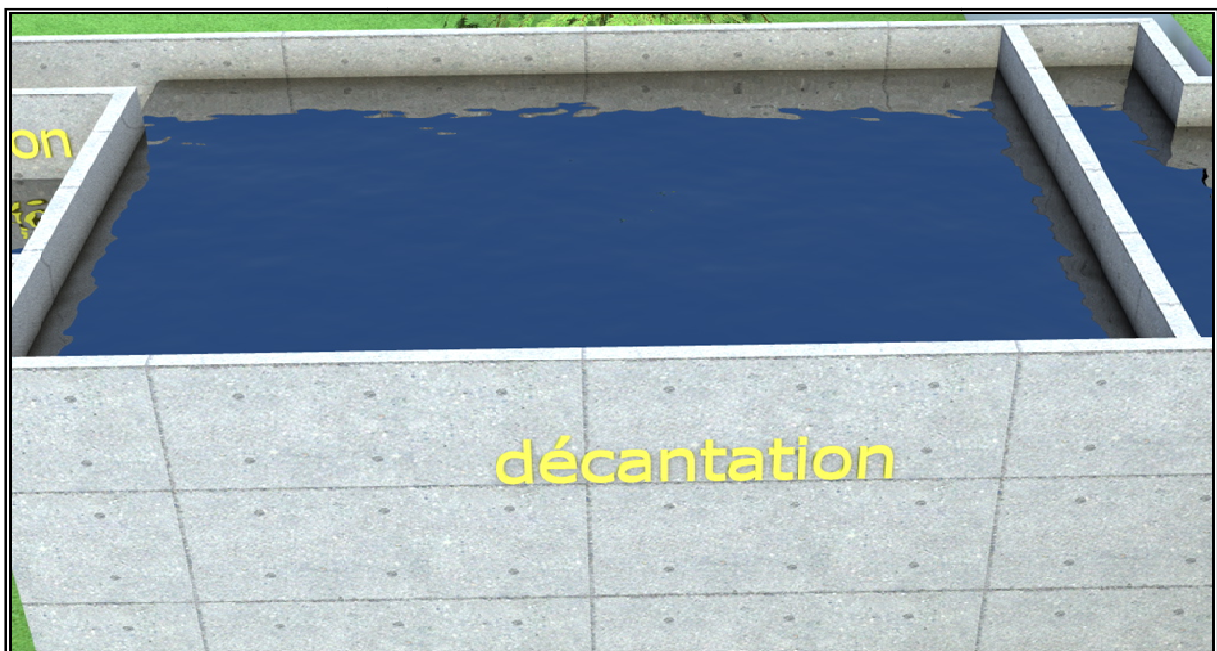
➤ **Dimensionnement du bassin de décantation**

Pour que la technique de la décantation statique soit efficace il faut que la hauteur du bassin soit considérable et que le fond du bassin soit incliné vers la vidange de fond, et le dimensionnement se fait en prenant un temps de séjour de 3 heures.

On a le débit à traiter égale a 1.6 l/s donc le volume que doit contenir le bassin de décantation est le volume d'eau soutiré pendant 3 heures.

Alors :  $V \text{ soutiré} = V (\text{bassin}) = 1.6 * 3600 * 3 / 1000 = 17.28 \text{ m}^3$

Donc le volume du bassin est de 18 m<sup>3</sup>, avec une hauteur de 1.5 m, largeur de 3 m et longueur de 4 m. et à l'amont du bassin, on aménage un déversoir qui déverse l'eau vers le bassin de filtration, comme on aménage une vidange de fond qui sert à nettoyer le compartiment.



**Figure VI.15** : bassin de décantation

#### VI.4.5.5. Bassin de filtration

La filtration est un procédé qui permet de clarifier une eau contenant des solides en suspension en la faisant passer à travers un milieu poreux ou média filtrant, et cette étape vient après la décantation. Et parmi les matériaux granulaires utilisés en traitement d'eau, le sable est le media le plus couramment mis en œuvre, qu'il s'agisse de production d'eau destinée à la consommation humaine, d'eaux de piscine, d'eaux pour utilisations industrielles, ou de filtration d'eaux issues de stations d'épuration en traitement tertiaire. Le sable doit répondre à certaines exigences afin d'être apte à la filtration. Il convient de plus de connaître ses caractéristiques afin de choisir le sable le mieux adapté à l'application pour laquelle il est destiné. Figure (VI.16) et (VI.17).

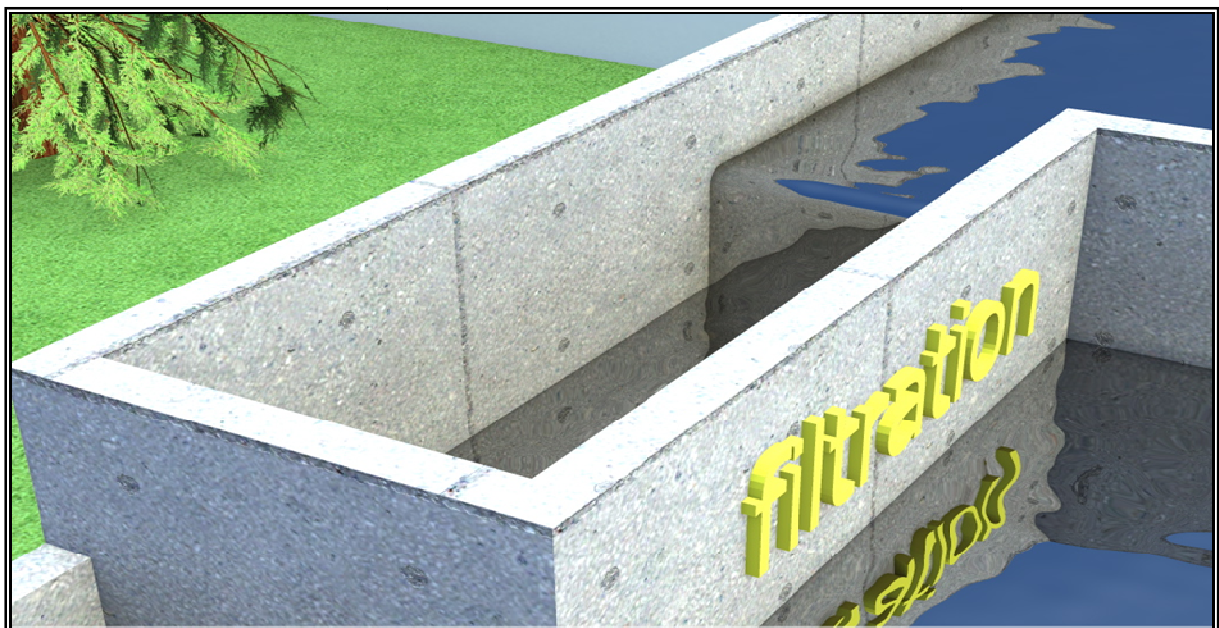


Figure VI.16 : bassin de filtration



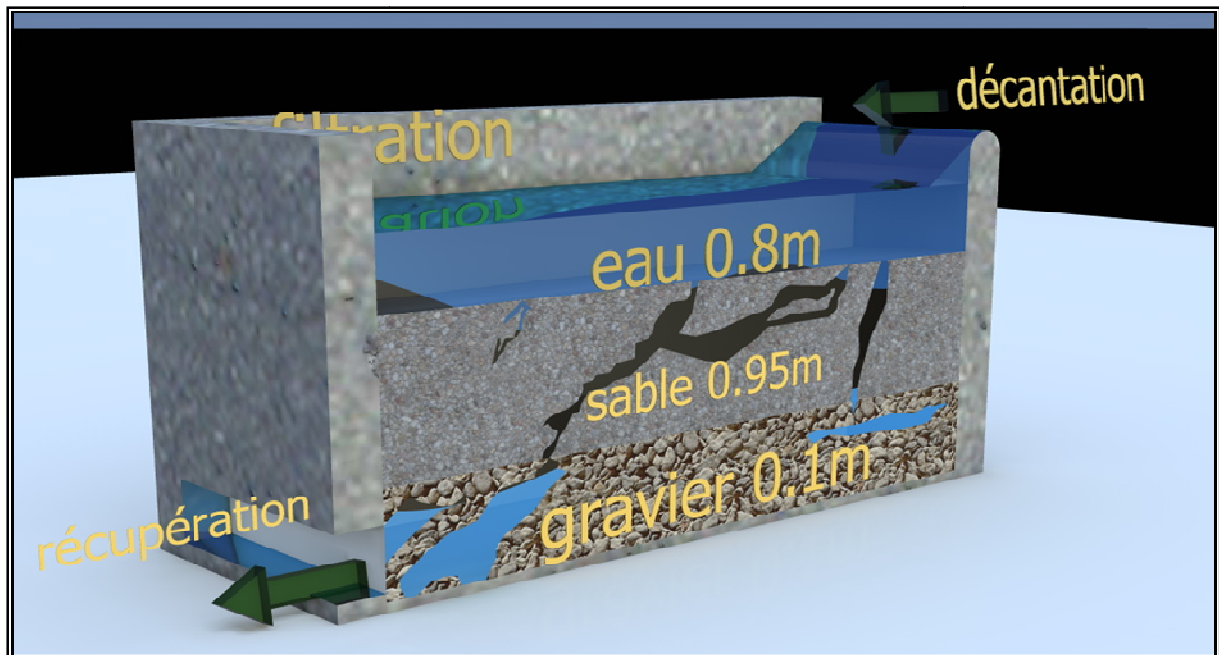


Figure VI.17 : Coupe verticale du bassin de filtration

a) Caractérisation du sable de filtration

➤ **Origine**

Le sable peut être extrait de rivières ou provenir de régions côtières (galets broyés).

➤ **Préparation et forme des grains**

Préparation

- sable de rivière : lavage → séchage → dépoussiérage → tamisages successifs ;
- sable de mer : lavage → concassage → séchage → dépoussiérage → tamisages successifs.

Forme des grains :

- ronde, pour les sables de rivières roulés ;
- anguleuse, pour les matériaux concassés.

A taille effective égale, l'augmentation de la perte de charge à travers d'un lit filtrant est légèrement plus importante avec des grains ronds qu'avec des grains anguleux, car ces derniers s'imbriquent moins bien que les premiers, d'où des sections de passage plus importantes. On en déduit que pour une même taille effective, la qualité de l'eau filtrée peut être meilleure avec un lit constitué de grains ronds.

La teneur en silice doit être la plus élevée possible et en tout cas supérieure à 80%

#### Masses volumiques vraie et apparente

La masse volumique vraie (= masse divisée par le volume, à l'exclusion du volume interparticulaire) d'un matériau non poreux comme c'est le cas du sable, varie de 2,6 à 2,7 kg/l en fonction de l'origine du sable, et en particulier de sa teneur en silice : plus celle-ci est élevée, plus la masse volumique vraie est élevée.

La masse volumique apparente (= masse divisée par le volume incluant le volume interparticulaire) dépend de la composition chimique du sable, mais aussi de sa granulométrie. Plus la taille effective est importante, moins grande est la masse volumique apparente.

La comparaison entre les deux masses volumiques, vraie et apparente, permet de définir le volume interparticulaire servant à la rétention des matières.

Ainsi, pour un sable de TE d10 de 0,95 mm, la masse volumique apparente est de l'ordre de 1,46 kg/l (sable de rivière roulé à 87% de silice), tandis que la masse volumique vraie est de 2,60 kg/l ; le volume interparticulaire est égale à  $(1,14 \times 100) * 2,6^{-1}$ , soit 44 % environ.

#### b) Mise en œuvre du sable filtrant

Le sable est mis en œuvre, dans des filtres à écoulement gravitaire. pour la distribution des fluides de lavage, il est prévu une couche support constituée de graviers dont la taille effective doit être égale de 4 à 4,5 fois la taille effective d10 du sable filtrant. La quantité de sable filtrant généralement mis en œuvre dépend de la taille effective choisie. On admet qu'une hauteur de couche correspondant à 1000 fois la taille effective, exprimée en mm, est satisfaisante, celle de la couche support étant prise égale à 100 mm.

Le sable utilisé pour une filtration d'une eau destinée à la consommation humaine a une taille effective TE de 0.95 mm, et donc la hauteur de la couche du sable correspond à 1000 fois sa taille effective.

Donc

$$H_{\text{sable}} = 1000 * 0.95 = 950 \text{ mm}$$

c) Dimensionnement des filtres

Vu l'importance de l'élimination du fer, les filtres doivent être dimensionnés en considérant les paramètres suivants :

Vitesse de filtration : 8.5 m/h

Granulométrie du sable : 0,95mm

Granulométrie du gravier : 3.8 mm

Hauteur du sable : 950 mm

Hauteur du gravier : 100 mm

Hauteur d'eau au dessus du sable : 0.8 m

Débit d'eau :  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{h}$

Donc, la surface totale de filtration est :

$$s = \frac{Q}{V} = \frac{6}{8.5} = 0.7 \text{ m}^2$$

Pour se mettre en sécurité, on prend une surface de filtres de  $1 \text{ m}^2$ . Ces filtres sont en béton armé et de forme parallélépipédique dont les dimensions sont :

- longueur du filtre :  $L = 1.5\text{m}$
- largeur du filtre :  $l = 0.7\text{m}$
- hauteur du filtre :  $H = 0.95 + 0.1 + 0.8 = 1.85 \text{ m}$

d) Procédures de lavage

Il existe deux modes de lavage des filtres à sable, soit par retour d'eau seule, soit en combinant eau et air. Le lavage des filtres à l'eau seule entraîne une stratification du média filtrant : les grains les plus petits se retrouvent dans la partie supérieure du lit filtrant, provoquant ainsi un blocage rapide et donc des lavages plus fréquents. Le lavage "air + eau" des filtres permet de conserver l'homogénéité du lit filtrant. La filtration est alors plus performante car elle se déroule en profondeur. Ce lavage se déroule en trois phases :

- air seul : détassage du média;
- air + eau à petit débit : déplacement hors du média des matières retenues;
- eau à grand débit : rinçage.

Pour cette phase le débit choisi ne doit provoquer aucune expansion du lit filtrant afin de ne pas le stratifier.

Il est à noter que dans le cas des filtres multicouches, on ne met pas en œuvre simultanément l'eau et l'air, ceci afin de conserver la stratification du lit.

#### VI.4.5.6. Bassin de récupération

C'est le dernier bassin de l'installation, il suit le bassin de filtration pour récupérer l'eau traitée et la transférer directement vers le réservoir de distribution. Figure (VI.18)

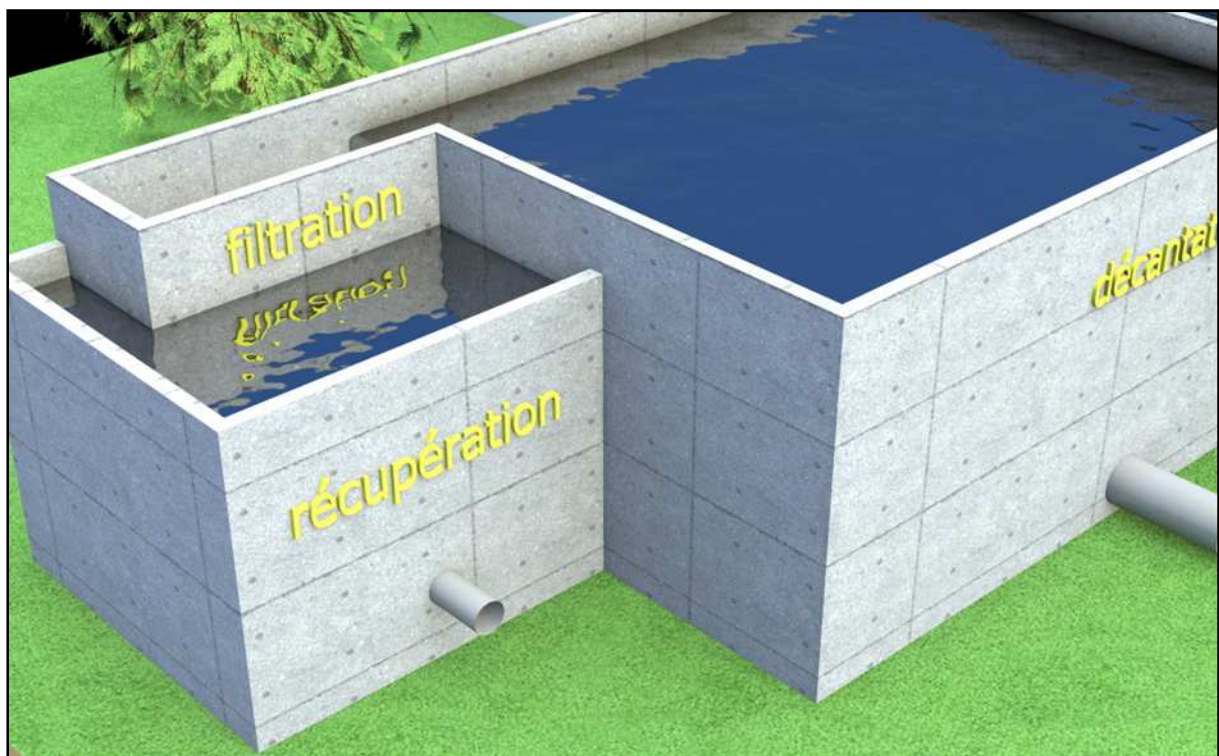


Figure VI.18 : bassin de récupération



CONCLUSION  
GÉNÉRALE

### CONCLUSION GENERALE

Les eaux souterraines parcourent plusieurs formations géologiques, elles prennent l'identité d'une couche pour la garder pour elles, où pour la transmettre à une autre couche.

Donc l'eau peut jouer le rôle d'un agresseur qui attaque les roches par son acidité et les détruit pour qu'elle se pollue, Comme, elle peut être victime d'une fragilité géologique.

Au terme de ce travail, et après avoir identifié les caractéristiques de l'eau du forage, et établi les conditions géologiques qui causent sa contamination, nous pouvons dire qu'il n'existe aucune loi générale qui assure la présence du fer dans l'argile, comme dans le grès numidien. Selon la lithologie de la région, et les conditions favorables qu'assure cette lithologie, on peut supposer que l'eau est contaminée par la couche d'argile, et que les grès numidien sont contaminés par l'eau à leur tour, donc l'eau était initialement contaminée pour qu'elle devienne contaminant. Comme on peut supposer que l'eau est directement contaminée par la présence du fer dans la couche des grès numidien.

Le choix de l'unité de déferrisation revient à son efficacité et son raisonnable dimensionnement, malgré qu'il est préférable de concevoir l'installation en prenant en compte qu'après un certain temps de fonctionnement, la mise en place (spontanée ou non) d'un complément biologique améliorera le rendement de l'installation, ce qui la rend apparemment surdimensionnée, néanmoins cela représente la solution la plus sécurisante ; En cas de difficulté de fonctionnement du complément biologique, la continuité de l'exploitation peut être maintenue en remettant en fonctionnement l'ensemble de l'installation initiale.

Après ces étapes de traitement l'eau sort bien traitée et prête à être destinée à la consommation humaine, et son efficacité ne sera remarquable qu'après deux ou trois jours de fonctionnement. Et si le goût reste un peu indésirable, on mélange cette eau avec une autre eau douce dans un réservoir avant sa distribution à la consommation.

L'adoption de la solution préconisée, une fois appliquée, permettra de résoudre le problème d'alimentation en eau potable de toute la région. L'aboutissement de ce travail n'a été possible que grâce à l'application de toutes les connaissances théoriques et pratiques acquises lors de notre cursus universitaire.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **[1] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR**

**[2] HENRI J. SCHOELLER, (Août1971).** « Pollution des Eaux. Souterraines ». Actes du Colloque de Moscou. **IAHS-AISH** Publ. No. 103, 1975.

**[3] N.A. PLOTNIKOV, (1962).** « Ressources en eaux souterraines : Classification et méthodes d'évaluation ». Editeurs **GAUTHIER-VILLARS et C<sup>ie</sup>**, Paris. 194 pages.

**[4] OLIVIER ATTEIA, (2005).** « Chimie et pollutions des eaux souterraines ». Editions **TEC&DOC**, Paris. 398 pages.

**[5] H. SCHOELLER, (1962).** « Les eaux souterraines ». Editeurs **MASSON & C<sup>ie</sup>**, Paris. 642 pages.

**Jean. LOUP.** « Les eaux terrestres ». Editeurs **MASSON & C<sup>ie</sup>**, Paris. 172 pages.

**R. BREMOND, (1965).** « Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines ». Editeurs : **GAUTHIER-VILLARS**, Paris. 118 pages.

**GILLI, ERIC, (2004).** « Hydrogéologie : objets, méthodes, applications ». Editeur : **DUNOD**, Paris. 303 pages.

**G. CASTANG, (1968).** « Prospection et exploitation des souterraines ». Editeur : **DUNOD**, Paris. 717 pages.

**LEGRAND. LUC, (1981).** « Les équilibre carbonique et l'équilibre calcocarbonique dans les eaux naturelles ». Editeur : **EYROLLES**, Paris. 176 pages.

**Jean-Yves GAL, (1989).** « Etude analytique des réactions chimiques dans l'eau ». Editeur : **TEC & DOC**, Paris. 488 pages.

**Réméniéras, GASTON 2<sup>ème</sup> édition (1980).** « L'hydrologie de l'ingénieur ». Editeur : **EYROLLES**, Paris. 456 pages.

**TEXTE IMPRIME, (1972)** « Contrôle géologique des forages : Formulaire du géologie de chantier ». Editeur : **TECHNIP**, Paris.

**Albert MABILLOT, (1986).** « Le forage d'eau : guide pratique ». Editeur : **JOHSON FILTRATION SYSTEMS** (Naintre). 237 pages.

**A. CHOQUIN, 2<sup>ème</sup> édition (1982).** « Cours de forage 1 : Paramètres et contrôle du forage ». Editeur : **TECHNIP**, Paris. 166 pages.

**LALLEMAND-BARRES A. et ROUX J.C. (1995).** « Méthodes de dépollutions des eaux souterraines ». Editeur : **B.R.G.M., Manuel et Méthodes, n° 27.** 180 pages.

**Jacques DELLEUR. (1999).** « The Handbook of Groundwater Engineering ». Editeur: **School of Civil Engineering Purdue University West Lafayette, Indiana.** 940 pages.

## **WEBOGRAPHIE**

[http:// Wikipédia.org](http://Wikipédia.org) : Minéraux et roches

[http:// dynamive.eu/TrtClassiques/TrtClassiques.html](http://dynamive.eu/TrtClassiques/TrtClassiques.html) : Traitement classique

<http://Lenntech.com>: Traitement fer-manganèse.

<http://Lenntech.com>: purification et traitement de l'eau

<http://www.gls.fr/memotec.htm>: Memotec30-Sable Filtration

<http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/>

[http://www.andrin-magnets.com/F\\_mainrenance.htm](http://www.andrin-magnets.com/F_mainrenance.htm): Déferrisation

<http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours/qge/index.html>: Qualité et pollution des eaux souterraines.

<http://www.aqua-planete.com/eau.php>