

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

*Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel*



كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم: علوم الأرض و الكون

Département : des Sciences de la Terre et de l'Univers

## Note de Cours

### Traçage chimique et isotopique des eaux

#### Master I : Hydrogéologie



Mr. DROUCHE Abdelmalek

Année Universitaire 2019-2020

## **Table des matières**

<b><u>Présentation des principaux traceurs chimiques et isotopiques</u></b>	<b>1</b>
Introduction.....	1
1- Définition d'un traceur.....	1
2- Les principaux traceurs naturels.....	1
2.1. Les chlorure .....	2
2.2. Les bromures.....	2
2.3. Les iodures .....	2
2.4. Les nitrate.....	2
3- Les principaux traceurs artificiels.....	2
4- Les traceurs isotopiques.....	6
4.1. Les isotopes dans les eaux souterraines.....	6
4.2. Les isotopes stables.....	6
4.3. Les isotopes radioactifs.....	7
<b><u>Composés chimique majeurs, mineurs et trace des eaux naturelles</u></b>	<b>8</b>
1. Les composés chimiques majeurs.....	8
- Les chlorures.....	8
- Les sulfates.....	8
- Les Bicarbonates.....	9
- Le sodium.....	9
- Le potassium.....	9
- Le calcium.....	9
- Le magnésium.....	9
2. Composés chimiques mineurs.....	10
- Phosphates $\text{PO}_4^{3-}$ .....	10
- Le Fer (Fe).....	10
- Le Manganèse (Mn).....	10
- L'Aluminium (Al).....	10
- Le Sulfure d'hydrogène.....	10
- Le fluor (F) .....	10
3. Composés chimiques en traces (ETM).....	10
4. Composés organiques.....	11
- La matière organique (MO) .....	11
- Les Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....	11
- Les Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ).....	11
- L'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).....	11
- La demande chimique en oxygène (DCO).....	12
- La demande biochimique en oxygène (DBO <sub>5</sub> ).....	12

<b><u>Méthode de réalisation d'un traçage</u></b>	14
I- Possibilités d'application.....	14
II – PRÉPARATION.....	14
1. Étude géologique et bibliographique.....	14
2. Contact avec les propriétaires (commune, particuliers...), utilisateurs et administrations concernées.....	14
3. Choix et acquisition des traceurs, choix du niveau de surveillance.....	14
4. Visite sur le terrain.....	15
5. Evaluation des risques.....	16
6. Evaluation du temps de transit probable.....	16
7. Mesures de débits et des paramètres physico-chimiques des eaux aux sources (impératives si l'on veut travailler en quantitatif).....	16
III – INJECTION.....	16
1. Choix des quantités à injecter.....	18
2. Calcul de la masse à injecter et préparation du ou des traceurs.....	19
IV - SURVEILLANCE DE LA RESTITUTION.....	20
1. Présence d'observateurs directs.....	20
2. Chronique détaillée.....	20
3. Précautions lors des prélèvements.....	20
V - ANALYSE ET INTERPRETATION DU TRACAGE.....	21
1- Principaux résultats et possibilités d'application des essais de traçage.....	21
2- Généralités sur le transport de masse en solution.....	21
3- La restitution et l'interprétation d'un traçage.....	22
<b><u>Jaugeage par dilution chimique</u></b>	24
1. Principe.....	24
2. Critères de choix.....	24
2.1 Choix du traceur.....	24
2.2 Méthode de traçage et types d'injection.....	25
3. Précautions.....	25
3.1 Bruit de fond.....	25
3.2 Distance de bon mélange.....	25
4. Détails de la méthode de traçage par dilution avec injection instantanée : vérification du débit et des vitesses avec le calcul des incertitudes.....	25
4.1 Principe.....	25
4.2. Ordre de grandeur de la masse de traceur à injecter.....	26

## **Présentation des principaux traceurs chimiques et isotopiques**

### **Introduction**

Le marquage de l'eau à l'aide de traceurs artificiels est une des techniques les plus importantes en hydrologie et hydrogéologie appliquées. L'exécution des essais de traçage dans les règles de l'art est une condition indispensable de leur interprétation correcte.

Les techniques de traçage trouvent leur origine en hydrogéologie karstique. Le premier essai de traçage scientifique connu s'est déroulé en 1887 à la perte du Danube près d'Immendingen. Il a permis de prouver la liaison hydraulique entre le Danube et la source de Ach, à l'aide d'uranine. Ce traceur fortement fluorescent est devenu par la suite le colorant le plus classique pour tracer l'eau, utilisé encore aujourd'hui avec un succès incomparable. Au cours des dernières décennies, les techniques de traçage ont été largement développées, si bien que les méthodes de traçage sont actuellement utilisées dans pratiquement tous les domaines de l'hydrologie et de l'hydrogéologie appliquées.

En **hydrogéologie**, le traçage constitue un outil précieux pour la détermination des systèmes d'écoulement et la caractérisation des processus de **mobilité des solutés** dans les eaux souterraines. Ceux-ci offrent la possibilité d'étudier sur l'objet lui-même certains aspects de l'écoulement et du transport en milieu souterrain.

### **1- Définition d'un traceur**

Un **traceur** est un élément ou un composé chimique, identifiable aisément par des méthodes physico-chimiques. Le **traçage** est l'utilisation d'un traceur pour suivre les déplacements de matières dans une réaction chimique ou dans l'environnement. On parle également de **marqueur** quand le but recherché est plus la mise en évidence d'une molécule que la détermination d'un flux de matière.

### **2- Les principaux traceurs naturels**

L'eau souterraine contient une quantité plus ou moins grande de substances organiques ou inorganiques, principalement en solution mais aussi sous forme colloïdale ou en suspension. Les matières en suspension ne se rencontrent généralement pas dans les eaux souterraines, car elles sont filtrées, du fait de l'écoulement lent à travers les interstices des aquifères. Elles peuvent cependant représenter un élément significatif, dans les systèmes à écoulement rapide, comme dans les karsts. Les éléments dissous, et dans une certaine mesure les colloïdes des eaux souterraines ont été souvent étudiés. L'étude de la chimie de l'eau souterraine pour prévoir la qualité de l'eau, est loin d'être simple — l'adsorption, la désorption et la dispersion peuvent modifier les concentrations au cours du transport.

Un **traceur naturel** est simplement, quel qu'en soit sa nature et son origine, un [traceur](#) existant dans le [milieu naturel](#), dans l'[environnement](#) naturel de la substance tracée. Parmi les traceurs naturels les plus utilisés on cite les anions inorganiques, ces composés se situent parmi les meilleurs traceurs chimiques conservatifs, car tous possèdent plusieurs des caractéristiques du traceur idéal.

Les principaux anions inorganiques proposés dans la littérature comme traceurs chimiques sont : les chlorures, les bromures, les iodures et les nitrates. Certains d'entre-eux présentent plusieurs des caractéristiques du traceur idéal, d'autres en possèdent moins. Certaines de ces propriétés vont aussi varier avec le milieu environnant.

### 2.1. Les chlorure

Leur concentration dans les eaux naturelles varie énormément. Ils y sont cependant souvent trop concentrés pour pouvoir être utilisés comme traceur. Dans les zones polluées, on voit également leur concentration augmenter à cause de la pollution, ce qui réduit leur usage. Cependant, on mentionne souvent leur utilisation dans la littérature, car ils peuvent être aisément détectés in-situ par des méthodes électriques (conductivité). De telles méthodes permettent, à un faible coût, d'équiper un site pour étudier la simulation d'une pollution accidentelle (Lainier, 1994 in Pauwels, 1995).

### 2.2. Les bromures

Dans les fluides naturels, leur concentration est plus faible que celle des chlorures, ils sont donc souvent utilisés au cours d'opération de traçage en hydrogéologie où ils présentent un comportement tout à fait conservatif. Ils ont également été utilisés avec succès en milieu géothermique (Adams, 1985 in Pauwels, 1995).

### 2.3. Les iodures

Leur concentration dans les eaux naturelles est généralement faible. Pour cette raison, ils ont été utilisés à de nombreuses reprises comme traceurs conservatifs. Ils donnent souvent de bons résultats. Cependant, selon le milieu on a observé des pertes qui peuvent en partie être dues à l'oxydation en iodates.

### 2.4. Les nitrates

Parmi les anions inorganiques que nous venons d'examiner, les nitrates sont probablement les traceurs les moins utilisés. Au cours de leur utilisation, on a souvent constaté des pertes car en présence de matière organique ou de minéraux sulfurés, ils sont sujets à des réactions de dénitrification. Un autre problème peut être rencontré lorsque le milieu à étudier contient des ions  $\text{NH}_4^+$  qui peuvent s'oxyder en nitrates en présence d'agents oxydants.

## 3- Les principaux traceurs artificiels

Le traçage artificiel consiste à injecter un traceur fluorescent, et puis de suivre son déplacement. Les questions que l'on tente à résoudre à l'aide des traceurs :

- Où s'écoule l'eau ?
- D'où vient-elle ?
- Y a-t-il une liaison hydraulique entre deux points donnés ?
- Comment des substances se propagent-elle dans l'eau ?

La fluorescéine a été synthétisée en 1871 par le chimiste Baeyer, sa première utilisation en tant que traceur remonte à 1878. Depuis lors, les composés fluorescents sont très largement employés dans les essais de traçage car ils présentent des avantages importants: Ils sont visuellement détectables;

- Ils peuvent être détectés à quelques ppb avec un fluorimètre ou une H.P.L.C. couplée d'un détecteur à fluorescence;
- Leur coût est assez faible, et;
- Ils présentent une faible toxicité.

Néanmoins, ils présentent aussi des inconvénients assez nombreux, qui vont différer d'un composé à l'autre. Les principaux problèmes rencontrés sont:

- Une décroissance photochimique et thermique;
- Une dépendance de la fluorescence avec le pH, la température et même la salinité;

- Le bruit de fond de certains fluides à tracer peut être important. Ce bruit de fond peut avoir plusieurs origines :
  - ✓ le fluide peut avoir une fluorescence naturelle, notamment en présence de matière organique (les acides humiques présentent une forte interférence avec les composés fluorescents), ou en présence de certains colloïdes, tels que les hydroxydes de fer,
  - ✓ de nombreux tests de traçage ont été effectués dans la région étudiée et le fluide devient “pollué” pour des tests ultérieurs;
- Ils présentent aussi une forte tendance à être adsorbés sur les formations rocheuses ;
- Malgré leur grand nombre, il est difficile de les utiliser lors d’opérations de multitraçage puisqu’ils présentent des maximums de fluorescence (et d’extinction) à des longueurs d’onde voisines.

Les caractéristiques des différents traceurs artificiels sont résumées dans les tableaux ci-dessous.



### La FLUORESCÉINE



### Rhodamine B

Tableau 1 : Aperçu de quelques caractéristiques des traceurs fluorescents (Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapport de IOFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)

Dénomination (Synonymes entre parenthèses)	Index couleur I.C.	Spectre excitation / émission [nm] <sup>1</sup>	Evaluation toxicologique <sup>2</sup>	Limite de détection ++++ = très bonne + = moyen	Retardement (dû à l'adsorption réversible) - = faible - - - = élevé	Restitution du traceur ++++ = élevée + = faible	Rapport qualité/prix du traceur <sup>3</sup> ++++ = très bon + = mauvais	Propriétés particulières	Remarques (voir aussi commentaires du chap. 2.3.2)
<b>Uranine</b> (Fluorescéine disodique) (Fluorescéine hydraulique)	45350	490 / 515	inoffensif	++++	-	++++	++++	peut être endommagée par des oxydants (p. ex. chlore, ozone)	globalement, le meilleur traceur
<b>Eosine</b> (Eosin Y) (Acid Red 316)	45380	512 / 537	inoffensif	+++	- -	+++	+++	grande sensibilité à la lumière	ne pas utiliser en même temps que du bromure
<b>Naphthionate</b> (Naphthionate de sodium) (Acide naphthionique)		323 / 418	inoffensif	+	-	++	++	bruit de fond élevé à la mesure	
<b>Amidorhodamine G</b> (Sulforhodamine G extra)	45220	530 / 555	inoffensif	+++	- - -	+	++		
<b>Sulforhodamine B</b> (Acide duasyne-rhodamine B 01, Amidorhodamine B)	45100	561 / 586	toxique pour l'environnement	++	- - -	++	++		limiter son utilisation dans les eaux de surface
<b>Rhodamine B</b> (Basazolrot 71 L)	45170	551 / 576	à déconseiller	+++	- - -	+	+	très forte adsorption	ne plus utiliser
<b>Rhodamine WT</b> (Acid red 388)		558 / 583	à déconseiller	++	- - -	+	+		à n'utiliser que dans les cas d'exception
<b>Pyranine</b>	59040	460 / 512	inoffensif	++	-	+	++	faible taux de restitution	
<b>Duasyne</b> Duasyne jaune fluorescent T		449 / 474		++	- -	++	++		n'est plus fabriqué
<b>Tinopal</b> (T-CBS-X, T-ABP liquide)		346 / 435	inoffensif	+	- - -	+	+	bruit de fond élevé à la mesure	

Tableau 2 : Qualification technique des traceurs artificiels pour différents milieux hydrogéologique (Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapport de IOFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)

**Evaluation :** ++ bon  
 + satisfaisant  
 0 en général peu indiqué, utilisation possible dans des conditions favorables  
 – à déconseiller

Traceur	Milieu karstique		Milieu poreux			Milieu fissuré	Infiltration de cours d'eau
	Injection en liaison directe avec le réseau karstique	Injection en liaison diffuse avec le réseau karstique	Injection directement dans l'eau souterraine	Injection en zone non saturée bien perméable	Injection dans les terrains de couverture à perméabilité limitée (p. ex. fouille en moraine)		
Uranine	++	++	++	++	++	++	++
Eosine	++	++	++	+	+	+	+
Naphthionate	++	+	++	+	0	0	+
Amidorhodamine G	++	+	+	0	0	0	0
Sulforhodamine B	++	+	+	0	0	0	0
Pyranine	++	+	+	0	0	0	–
Duasyne <sup>4</sup>	++	+	+	0	0	0	–
Tinopal	+	0	0	–	–	–	–
Chlorures	++	+	++	0	–	–	–
Bromures	++	+	++	0	–	–	–
Lithium	++	0	+	–	–	–	–
Borax	+	0	0	–	–	–	–
Bactériophages	++	+	+	0	–	0	–
Microsphères	+	0	0	–	–	–	–



## 4- Les traceurs isotopiques

### 4.1. Les isotopes dans les eaux souterraines

Tracer les eaux souterraines en utilisant les isotopes de l'environnement offre une information unique et supplémentaire sur l'origine et le déplacement des eaux souterraines ainsi que des éléments dissous; ceci permet également une évaluation quantitative des mélanges et d'autres processus physiques tels l'évaporation et les échanges isotopiques dans les systèmes géothermiques. Souvent, des interactions eaux-roches, secondaires, décisives pour déterminer si un isotope se comporte comme un traceur conservatif ou non, peuvent être étudiées. Sous des conditions géochimiques et hydrochimiques convenables il est possible de dater les eaux souterraines.

### 4.2. Les isotopes stables

Les isotopes du même élément chimique ont des propriétés physique et chimique presque identiques. Cependant, du fait de leur faible différence de masse, ils présentent des niveaux de réactions différents et des abondances différentes dans deux composés chimiques ou phases en état d'échange isotopique. Egalement, les processus physiques comme l'évaporation, la diffusion, la condensation, la fonte, ect. produisent des différenciations isotopiques. Toutes ces variations de la composition isotopique, issues des processus chimique et physique, dans les composés ou phases, présents dans le même système, s'appellent le fractionnement isotopique.

Les variations du rapport atomique R de l'isotope rare à l'isotope abondant d'un échantillon est généralement déterminé à l'aide d'un spectromètre de masse et exprimé en valeur delta par rapport à un matériel de référence (standard, std):

$$\delta = \frac{R_{spl}}{R_{std}} - 1 (\times 1000\text{‰})$$

Les constituants atomiques de la molécule d'eau les plus importants sont  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  ( $\Rightarrow \delta^{18}\text{O}$ ) et  $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$  ( $\delta^2\text{H}$ ). Ces derniers possèdent le plus vaste champ d'application pour l'étude des eaux souterraines, par exemple, tracer l'origine de l'eau, le mode de recharge, déterminer l'âge, à court terme du fait de la variation saisonnière ou à long terme du fait de la différence entre les eaux souterraines de l'Holocène et du Pléistocène.

**Remarque : Il faut garder en mémoire que la valeur  $\delta^{18}\text{O}$  est très faible et que ‰ n'est pas une unité. ‰ signifie 1 sur 1000. En conséquence, la valeur delta est toujours plus petite que 1, quoique des nombres en pour mille, e.g. 25‰, soient élevés: 25‰ est équivalent à 0.025.**

Les isotopes du carbone  $^{13}\text{C}$   $^{12}\text{C}$  ( $\Rightarrow \delta^{13}\text{C}$ ) jouent un rôle important pour la quantification des réactions eau-roche. Leur rapport permet aussi d'identifier dans l'eau le  $\text{CO}_2$  d'origine biogénique ou issu des carbonates et de déterminer le contexte géologique de la recharge.

Les isotopes de l'Azote  $^{15}\text{N}$  et  $^{14}\text{N}$  ( $\Rightarrow \delta^{15}\text{N}$ ) sont des traceurs anthropiques utiles. Les fractionnements isotopiques biogéniques sont complexes, mais permettent souvent de déterminer l'origine d'une pollution organique des eaux (e.g. Heaton 1984).

Le rapport isotopique des isotopes stables du soufre  $^{34}\text{S}$  et  $^{32}\text{S}$  ( $\Rightarrow \delta^{34}\text{S}$ ) permet de différencier l'origine marine, évaporitique et volcanique du sulfate dans l'eau souterraine (Krouse 1980).

### 4.3. Les isotopes radioactifs

L'autre groupe important de méthodes de l'Hydrologie isotopique est celui relatif aux isotopes radioactifs de l'environnement. La datation isotopique est leur principal champ d'application. Les horloges commencent à fonctionner dès que le radionucléide rejoint l'eau souterraine i.e. lors de la recharge. L'unité de temps est donnée par la demi-vie au cours de laquelle toute l'activité d'un isotope décroît de 50%. Après 10 demi-vies l'activité reste de seulement 19k de l'activité initiale. L'éventail des demi-vies pour les différents isotopes de l'environnement est large, de 300 000 ans ( $^{36}\text{Cl}$ ), à 5730 ans ( $^{14}\text{C}$ ) et 12.43 ans ( $^3\text{H}$ ). Il y a deux grands principes pour dater les eaux souterraines: dans le cas de radionucléides cosmogéniques l'activité initiale spécifique de tout radionucléide donné, dans l'eau souterraine qui s'infiltré, est connue ou peut être estimée. Elle décroît alors selon la loi de la décroissance radioactive, de laquelle l'âge de l'échantillon se déduit :

$$t = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \ln \left( \frac{A_{\text{init}}}{A_{\text{spl}}} \right)$$

où  $T_{1/2}$  est la demi-vie du radionucléide donné (Fig.1). La méthode  $^{14}\text{C}$  est la représentante la plus importante de ce type d'application des traceurs. Elle fournit un âge de l'eau souterraine ancienne en datant le carbone inorganique dissout.

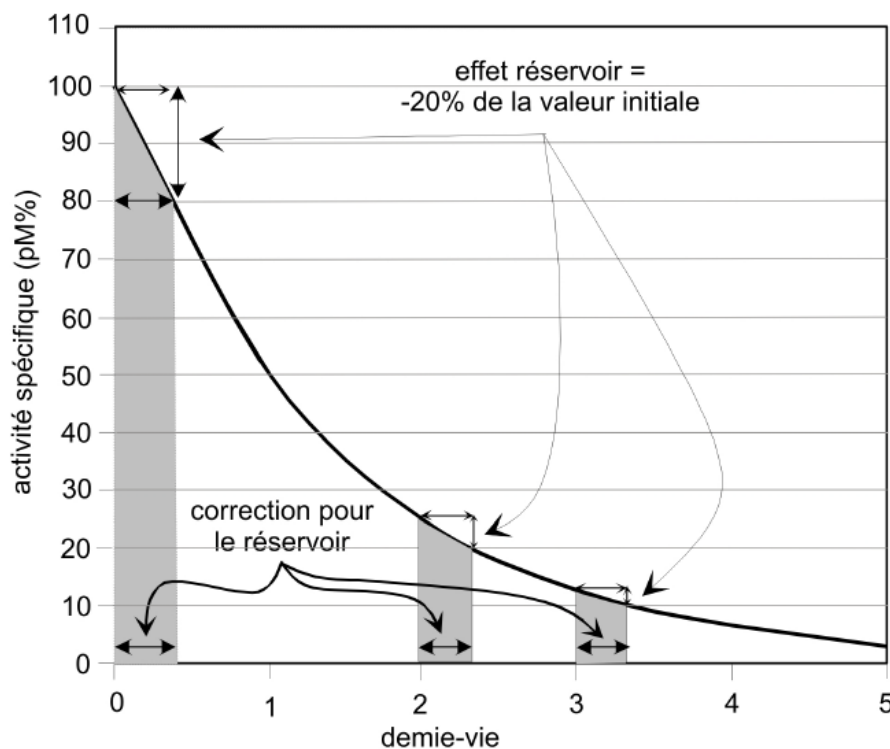


Figure 1 : Décroissance de l'activité spécifique  $A_{\text{spl}}$  d'un échantillon par décroissance radioactive en unité de demi-vie et pour deux états correspondant à des activités initiales différentes  $A_{\text{init}}$ . 100 pMX et 80 pMX. Evidemment l'âge apparent du matériel dont l'activité  $A_{\text{init}}$  est la plus basse est plus élevé. Les différences relatives d'activité des deux matériaux (effet réservoir) exactement comme la différence d'âge (correction liée au réservoir) restent constantes et indépendantes de l'âge.

## **Composés chimique majeurs, mineurs et trace des eaux naturelles**

Que ce soient des éléments majeurs, mineurs ou traces, que ce soient des isotopes stables ou radioactifs, ou encore des matières organiques, nous traitons dans cette partie de l'ensemble des marqueurs qui caractérisent les principales origines naturelles ou anthropiques généralement retrouvées dans les eaux souterraines. En ce qui concerne les éléments dits « majeurs », c'est-à-dire les anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux, nous nous référons à leur concentration volumique (en  $\text{mg.l}^{-1}$ ). Les éléments traces sont les éléments présents à de très faibles concentrations dans les eaux (inférieures à  $\mu\text{g.l}^{-1}$ ). Parmi ces éléments ce sont les métaux les plus classiquement utilisés en hydrogéologie.

### **1. Les composés chimiques majeurs**

La minéralisation totale d'une eau de boisson de bonne qualité est de l'ordre de quelques centaines de  $\text{mg.l}^{-1}$ . les textes donnent une limite à ne pas dépasser 1  $\text{2mg.l}^{-1}$ .

#### **- Les chlorures**

C'est un élément très répandu dans la nature, il se trouve sous forme de sels de sodium ( $\text{NaCl}$ ), de potassium ( $\text{KCl}$ ) et de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), la majorité des ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), se trouvent dans les océans.

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines et sont liés principalement à la dissolution des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses (*Beaudry, 1984*). La présence des chlorures peut être attribuée à l'action anthropique tel que, les effluents de l'industrie chimique, l'exploitation des puits de pétrole et des mines de potasse, les rejets des égouts, les eaux de drainage d'irrigation et l'invasion marine dans les régions côtières.

Les eaux chlorurées alcalines sont laxatives et peuvent poser des problèmes aux personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires et rénales.

#### **- Les sulfates**

L'origine des sulfates est liée à la dissolution des formations gypseuses, aux pesticides et aux engrais à base de sulfates. L'eau de pluie peut en fournir des quantités importantes par oxydation dans l'atmosphère de l'anhydrite sulfureuse lors de la combustion du charbon et du pétrole (*Kemoukh, 2007*). Les ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sont liés aux cations majeurs :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ . A ceux du  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  ; la plupart des sulfates sont solubles dans l'eau. Ils peuvent néanmoins être réduits en sulfures, volatilisés dans l'air en hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ), précipités en sel insoluble ou assimilés par des organismes vivants.

Plusieurs types d'industries qui peuvent fournir des teneurs appréciables en sulfates : tanneries, industrie papetière et textile, ateliers de décapage métallique. Les sulfates d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  et de fer  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , largement utilisés pour la floculation dans le traitement de l'eau, augmentent également la teneur en sulfates des eaux traitées.

La forte concentration en sulfates provoque de troubles gastro-intestinaux; aussi elles peuvent donner un goût désagréable (*Beaudry, 1984*). L'organisation mondiale de la santé recommande comme valeur limite 250  $\text{mg.l}^{-1}$ . L'union européenne indique un niveau guide de 25  $\text{mg.l}^{-1}$  et une concentration maximale admissible de 250  $\text{mg.l}^{-1}$  (*Ahonon, 2011*).

#### **- Les Bicarbonates**

Les bicarbonates sont des sels dérivés de l'acide carbonique, à teneur réduite en hydrogène et contiennent deux fois plus d'acide que les carbonates. La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie ...) par des eaux chargées en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (*Belhadj, 2006*).

**- Le sodium**

Le sodium est le 6<sup>ème</sup> élément du point de vu abondance naturelle. Ce métal, très abondant (environ 26 g/kg de la croûte terrestre soit 2.83 %) ne se rencontre pas naturellement à l'état natif mais toujours associé à d'autres éléments chimiques (chlorures, sulfates,...), cet élément joue un rôle important en agriculture, pour l'irrigation, du fait de son action sur la perméabilité des sols. Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl (le sel gemme), des formations argileuses, argilo-marneuses, des rejets des eaux usées d'origine domestique, salage des routes verglacées et diverses industries (*Beaudry, 1984*). Le sodium est, après le chlore, le deuxième élément dissous le plus abondant dans l'eau de mer (*Reinberg, 1971*).

Il existe avec des concentrations variables dans la totalité des eaux, son absorption ne provoque pas de danger sauf pour les malades qui souffrent d'hypertension de cardiopathies artériosclérotique.

**-Le potassium**

Le potassium, 7<sup>ème</sup> élément en abondance naturelle, il est beaucoup moins abondant que le sodium et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. Il ne représente aucun inconvénient particulier bien que le potassium soit une des sources possibles de radioactivité de l'eau (*Potelon, 1998*). On le retrouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minerais. Il se trouve aussi dans la végétation sous forme de carbonates. Certains rejets industriels et d'usines d'engrais peuvent entraîner des quantités de potassium relativement importantes dans l'eau (*Rodier, 1978*).

C'est un élément à peu pris constant dans l'eau, les concentrations dans l'eau de boisson dépassent rarement 7 mg/l.

**- Le calcium**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, c'est le cinquième élément le plus abondant dans la nature. Leur teneur dans l'eau, qui peut varier de 1 à 150 mg/l est liée principalement à deux origines naturelles :

- la dissolution des formations carbonatés ( $\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{++} + \text{CO}_3^{--}$ ),
- soit par dissolution des formations gypsifères ( $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--} + 2(\text{H}_2\text{O})$ ).

Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables, par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite (*Mekaoussi, 2013*).

Le calcium peut provenir de l'oxyde de calcium utilisé dans le bâtiment, la production de papier, le raffinage du sucre et du pétrole, la tannerie et le traitement des eaux brutes et résiduaires. Dans les cours d'eau pollués organiquement, la concentration en calcium peut être accrue car les protéines et acides faibles provenant de l'oxydation des matières organiques augmentent la mise en solution du carbonate de calcium.

**- Le magnésium**

Le magnésium est le huitième élément le plus abondant dans la nature. Ses principales sources sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires (*Day, 1963*), ainsi que sa large utilisation industrielle (alliage, pyrotechnie, batteries sèches, réducteur chimique, engrais, céramiques, explosifs, médicaments,...). Dans les régions riches en roches magnésiques, l'eau peut contenir des concentrations de 10 à 50 mg/l de cet élément. Les sulfates et les chlorures de magnésium sont très solubles et l'eau en contact avec la roche mère peut contenir plusieurs centaines de milligrammes de magnésium par litre (*Becker, 1972*).

## 2. Composés chimiques mineurs

- **Phosphates  $\text{PO}_4^{3-}$**  : Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta  $\text{HPO}_3$ , pyro  $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$  et ortho  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphates sont données par :



- **Le Fer (Fe)** : Le Fer est classé au quatrième rang des éléments de la croûte terrestre parmi les métaux lourds par ordre d'abondance. On le trouve surtout sous forme  $\text{Fe}^{+2}$  ou  $\text{Fe}^{+3}$ . Le fer dissous dans les eaux souterraines est sous forme réduite ( $\text{Fe}^{+2}$ ), qui est soluble. Ce dernier est oxydé en  $\text{Fe}^{+3}$  par le contact avec l'oxygène de l'air, le  $\text{Fe}^{+3}$  précipite sous forme d'hydroxydes insolubles dans l'eau et sont précipités ou adsorbés par les sédiments. (*Gouadia, 2008*)

- **Le Manganèse (Mn)** : Le manganèse est très répandu dans la nature. Les concentrations dans l'écorce terrestre peuvent varier de 500 à 600 mg/kg. Les minerais les plus connus sont la pyrolusite, la rhodocrosite, la brunîtes. Certaines eaux souterraines ont des teneurs de l'ordre de 1mg/l en particulier lorsqu'il y a support en milieu réducteur, ou sous l'action de certaines bactéries (*Rodier, 1978*).

- **L'Aluminium (Al)** : La question de l'aluminium se pose essentiellement après traitement de l'eau avec un composé d'aluminium (coagulant). Même si aucun risque sanitaire n'a pu être prouvé, on évoque le rôle aggravant de l'aluminium dans la maladie d'Alzheimer. D'après l'OMS, la présence d'aluminium à des concentrations supérieures à 0.2 mg/l provoque souvent des plaintes de la part des consommateurs, en raison de la floculation de l'hydroxyde d'aluminium dans les canalisations et d'une coloration de l'eau par le fer.

- **Le Sulfure d'hydrogène** : L'hydrogène sulfuré est un toxique majeur par inhalation. Dans les eaux, la présence de ce gaz et de sulfures est susceptible de provenir soit d'eau usée, soit de pollutions industrielles.

- **Le fluor (F)** : Le fluor dans les eaux souterraines est l'apatite présente dans les bassins phosphatés, et la fluorine présente dans les roches magmatiques alcalines et dans des filons. Les zones de thermalisme sont également fréquemment concernées. C'est essentiellement le temps de contact entre roche et eau souterraine, ainsi que contrôles chimiques qui sont la cause principale des concentrations élevées en iode. Le fluor est reconnu comme essentiel dans la prévention des caries dentaires. Cependant, une ingestion régulière d'eau dont la concentration en fluor est supérieure à 2 mg/L (*Rodier, 1978*).

## 3. Composés chimiques en traces (ETM)

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds dont la densité est supérieure à 5, et qui comprend les métaux Sb, Ag, Cd, Cr, Co, Cu, Sn, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Au, Pb, Zn, auxquels il est parfois rajouté Al et Se ( $d < 5$ , mais rencontrés à l'état de traces dans les eaux souterraines). Cependant, la classification en métaux lourds est souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement « lourds » (par exemple le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas des métaux (c'est le cas de l'arsenic qui est un métalloïde<sup>4</sup>). Ce terme générique désigne donc indistinctement des métaux et métalloïdes réputés toxiques. Pour ces différentes raisons, l'appellation «éléments traces métalliques » -ETM- ou par extension «éléments traces» est préférable à celle de métaux lourds.

La présence d'ETM dans les eaux peut provenir d'une dissolution de certains minéraux constitutifs du sol et du sous-sol (origine naturelle) ou d'une introduction directe ou indirecte (contamination, pollution). Par exemple l'épandage d'eau usées à la surface du sol, le stockage de déchets industriels ou ménagères, la combustion de carburants fossiles peuvent occasionner une pollution des eaux de surface et des sols par les métaux. Le lessivage de ces

sols par les eaux météoriques ou d'irrigation peut entraîner un transport plus ou moins important des éléments et une contamination des eaux souterraines.

Les ETM se dissolvent très bien dans une eau acide. Dans des eaux neutres ou basiques, ils précipitent et s'accumulent principalement dans la phase solide. L'analyse de ces solides permet ainsi d'obtenir une vue de l'ensemble des déversements en métaux lourds qui ont eu lieu. Généralement, ils caractérisent certains types de pollution. La présence de cuivre et de nickel, est un signe des rejets provenant d'industries de traitement de surface des métaux. Le chrome dénonce la présence d'une tannerie. Le plomb est lié à des pollutions diffuses (apports dus aux transports routiers et à l'existence de sites industriels). Le zinc est évacué par des industries qui pratiquent la galvanisation ou la préparation d'alliages, tels que le laiton et le bronze. Il est également libéré lors du contact entre les eaux de ruissellement et les matériaux galvanisés (ex. toitures métalliques). Le cadmium peut notamment être rejeté par des usines de galvanoplastie et des industries chimiques de textiles et de teintures.

#### 4. Composés organiques

- **La matière organique (MO) :** La matière organique est principalement issue de la décomposition des végétaux, des animaux et des microorganismes. Il est donc difficile d'en donner une description précise ou une composition moyenne. Elle participe à beaucoup de paramètres de qualité de l'eau : couleur, odeurs, saveurs...etc (*Lounnas, 2008*).

La contamination des eaux par des matières organiques est mesurée par l'oxydabilité au permanganate de potassium. Pour l'eau de boisson, la valeur idéale est de 2 mg /l.

- **Les Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) :** L'azote constituant fondamental de la matière est présent actuellement dans les eaux souterraines indispensables aux végétaux qui utilisent la forme  $\text{NO}_3^-$  nitrate.

- **Sources des nitrates**

Pluies

- 10% de l'azote viennent des éclairs  $\text{NH}_4^+$  est la source principale de l' $\text{N}_2$  des pluies.
- Par dénitrification  $\text{NO}_3^- \Rightarrow \text{N}_2$  dissous lors de la chute des pluies.
- Pollution atmosphérique.

Dans les eaux souterraines les  $\text{NO}_3^-$  viennent du drainage des sols par minéralisation de la matière organique (naturelle ou ajoutée pour la fertilisation)  $\Rightarrow$  grandes plaines de cultures.

- **Echelles des concentrations**

Eaux de surfaces non contaminées : 1 à 5 mg/l en  $\text{NO}_3^-$  ;

Eaux souterraines : 0 à quelques centaines de mg/l ;

- **Les Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) :** Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ), soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante.

Les nitrites sont répandus dans le sol, dans les eaux et dans les plantes mais en quantités relativement faibles. En général, dans les eaux de surface, leur teneur excède rarement 1 mg/l. Les nitrites non liés à une pollution, se trouvent parfois dans les eaux pauvres en oxygène (sondages profonds,...). La pollution atmosphérique (oxyde d'azote) favorise l'augmentation des teneurs en nitrites.

- **L'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) :** Sont désignées sous le terme ammoniac, des formes ionisées (ion ammonium,  $\text{NH}_4^+$ ) et non ionisées ( $\text{NH}_3$ ). L'azote ammoniacal est assez souvent rencontré dans les eaux et traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. Il constitue un des maillons du cycle de l'azote. L'ammoniaque est un gaz soluble

dans l'eau, mais suivant les conditions de pH, il se transforme, soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée.

L'azote ammoniacal des eaux superficielles peut avoir pour origine naturelle la décomposition des déchets végétaux et animaux. L'ammoniaque se transformant assez rapidement en nitrates et nitrites par oxydation, sa teneur dans les eaux de surface est normalement faible (inférieure à 0,2 mg/l). L'ammoniaque peut être rencontré dans les eaux de pluie (0,1 à 2 mg/l) et dans celles provenant des sols tourbeux et marécageux ; dans ce dernier cas, elle a une origine purement végétale.

Des eaux profondes peuvent également se charger en ammoniaque par réduction des nitrates sous l'action de bactéries ou par des sables qui renferment des minéraux contenant du fer (par exemple, glauconie). Habituellement, les eaux souterraines sont pauvres en azote ammoniacal. Mais des eaux issues de sols riches en substances humiques ou riches en fer peuvent présenter des teneurs de l'ordre de 1 à 3 mg/l.

La présence d'azote ammoniacal en quantité relativement importante peut être l'indice d'une pollution par des rejets d'origine humaine ou industrielle (industries chimiques, engrais, azotés, cokeries, fabrique de glace, industries textiles...).

**- La demande chimique en oxygène (DCO) :** C'est une mesure de toutes les matières organiques (ou presque) contenues dans les eaux naturelles ou usées, qu'elles soient biodégradables ou non biodégradables.

L'oxydation est effectuée ici dans des conditions énergiques, par voie chimique. Elle se fait sous l'action d'un oxydant puissant (bichromate de potassium), en milieu acide fort ( $H_2SO_4$ ) et au reflux pendant deux heures.

La DCO constitue donc un paramètre important. C'est un test rapide, très utile pour la surveillance des eaux usées et des rejets industriels (surtout ceux à caractère toxique qui se prête mal aux mesures de DCO, exprimée, elle aussi en mg/l d'oxygène, diffère de celle de la -DBO.

**- La demande biochimique en oxygène (DBO<sub>5</sub>) :** L'oxydation des composés organiques biodégradables par les microorganismes entraîne une consommation d'oxygène ; le milieu exerce donc une certaine demande biochimique d'oxygène. La mesure de cette DBO permet d'évaluer le contenu d'une eau en matières organiques biodégradables et donc, dans une certaine mesure, sa qualité ou son degré de pollution.

La dégradation complète des matières organiques peut être relativement longue (plusieurs semaines). D'autre part, l'oxydation des dérivées ammoniacaux et des nitrites en nitrates (nitrification) absorbe également de l'oxygène. Cette nitrification, dans les eaux naturelles, ne débute qu'au bout d'une dizaine de jours. Pour ces deux raisons, on mesure la DBO en 5 jours, ou DBO<sub>5</sub>, c'est-à-dire la quantité d'oxygène consommée ; pendant ce laps de temps, pour l'oxydation partielle des matières organiques biodégradables sous l'action des microorganismes. L'analyse de la DBO<sub>5</sub> est surtout intéressante pour l'appréciation de la qualité des eaux brutes.

Le tableau suivant, classe les eaux du point de vue qualité selon les valeurs de DBO<sub>5</sub>.

Tableau 3: Qualité de l'eau en fonction de la DBO<sub>5</sub> (**BERRYMAN D, 1990**)

DBO <sub>5</sub>	Qualification de l'eau
DBO <sub>5</sub> < 1 mg/l d'O <sub>2</sub>	Excellente qualité
DBO <sub>5</sub> = 2 mg/l d'O <sub>2</sub>	Bonne qualité
DBO <sub>5</sub> = 3 mg/l d'O <sub>2</sub>	Qualité moyenne
DBO <sub>5</sub> = 5 mg/l d'O <sub>2</sub>	Eau moyennement polluée
DBO <sub>5</sub> > 10 mg/l d'O <sub>2</sub>	Eau polluée

## Références

- Adams M.C., 1985. Tracer Stability and Chemical Changes In An Injected Geothermal Fluid During Injection-Backflow Testing at the east Mesa Geothermal Field. Proceedings, Tenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California.
- Ahonon. A., 2011. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface dans les zones montagneuses du sud-ouest du Togo : cas du canton de lavie, mémoire master, Université de Lome. 42 pp.
- Beaudry, T., Henry, T., M., 1984. Chimie des eaux, édition. Les griffons d'argiles, 1ère, édition, INC Canada. 537 pp.
- Becker, E., Durfor, C.J., 1972. Constituents and properties of water. Dans: Water quality in a stressed environment. W.A. Pettyjohn (dir. de publ.). Burgess Publishing Company. – AELB, 49 p.
- Belhadj, M.Z., 2006. Etude de la pollution du barrage de Zit-Emba Commune de Bekkouche Lakhdar Wilaya de Skikda, Mémoire de Magister, Univ. Batna. 107 p.
- Day, E.H., 1963. The chemical elements in nature. London, U.K. Edit. G. George Harrap & co London.
- Gouadia. L., 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord Est Algérien. Thèse de Doctorat. Univ Annaba. 130p.
- Kemoukh, S., 2007. Dégradation de la qualité des eaux du barrage de zerdezas suite à une pollution naturelle w.de Skikda, mémoire de magister, Univ. Batna. 117 p.
- Lainier F., 1994. Simulation d'une pollution sur un champ captant auprès d'un fleuve –suivi dans l'espace et dans le temps à partir d'un traceur NaCl à l'aide d'une méthode électrique. Jour. Appli. Gophys., 31 , pp.165-169.
- Lounnas, A., 2008. Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station hamadi-kroma de skikda, Algérie, mémoire de magister. Univ. du 20 Août 1955 Skikda. 120 p.
- Mekaoussi, N., 2013 : Comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface de Hammam Debagh (Est algérien), mémoire de magister, Univ. de Batna, 110 p.
- Pauwels. H., 1995. Evaluation de traceurs artificiels pour l'étude du transport de solutés dans les eaux souterraines. Rapport du BRGM R 38323. 90p.
- Potelon, J.L., Zyman K., 1998. Le guide des analyses d'eau potable. Edition, La Lettre du Cadre Territorial, Voiron, France.
- Reinberg, A., 1971. Le sodium et la vie, 2ème édition, PUF, Paris. 128 pp.
- Rodier, J., 1978. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Coll. Dunod Technique, 6<sup>ème</sup> édition. Paris, 1135 pp.
- Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie Berichte des BWG, Serie Geologie - Rapports de l'OFEG, Série Géologie - Rapporti dell' UFAEG, Serie Geologia No 3 - Berne, 2002



## **Méthode de réalisation d'un traçage**

### **I- Possibilités d'application**

Les possibilités d'application des essais de traçage sont multiples et diversifiées en fonction des types d'aquifères et des domaines d'application. Le tableau ci-dessous résume ces possibilités.

<b>Type d'aquifère</b>	<b>Possibilité d'application des traceurs</b>
Aquifère Karstique	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconnaissance régionale des écoulements souterrains</li> <li>-Elaboration de modèles conceptuels des systèmes karstiques</li> <li>-Mise en évidence de cheminement des eaux karstiques</li> <li>-Délimitation de bassins d'alimentation de sources karstiques</li> </ul>
Aquifère en roches meubles	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Etudes régionales de l'écoulement souterrain</li> <li>-Délimitation de bassins d'alimentation</li> <li>-Délimitation de zones d'apport de matières polluantes</li> <li>-Détermination de paramètres de l'aquifère</li> <li>-Simulation expérimentale de propagation de polluants</li> </ul>
Ecoulement de versant et aquifère en roches fissurées	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mise en évidence d'écoulements en roches cohérentes</li> <li>-Etudes de structures aquifères (fissures, failles, sillons, limites de bancs, etc.)</li> <li>-Mise en évidence d'écoulements préférentiels dans les versants (veines d'eau)</li> </ul>
<b>Domaines d'application</b>	<b>Objectif de l'utilisation des traceurs</b>
Captages d'eau souterraine/source	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détermination du bassin d'alimentation de captages</li> <li>-Vérification qu'un point donné se trouve dans le bassin d'alimentation d'un captage</li> <li>-Etude des apports respectifs d'eaux différentes.</li> </ul>
Interaction eaux de surface-eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection et localisation de tronçons d'infiltration ou d'exfiltration de cours d'eau</li> <li>-Détection d'écoulements sous les cours d'eau</li> <li>-Identification de lieux d'exutoires de lacs fermés</li> </ul>
Décharges	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vérification d'écoulements sous des décharges existantes</li> <li>-Contrôle des voies d'infiltration: les eaux météoriques s'écoulent-elles vers les drainages prévus?</li> <li>-Contrôle de l'étanchéité des couches de couverture</li> <li>-Evaluation de sites pour de nouvelles décharges, p ex. vérification qu'un site soit hors du bassin d'alimentation de captages</li> <li>-Vérification du bon emplacement de points de surveillance</li> </ul>

## **II - PRÉPARATION**

### **1. Étude géologique et bibliographique**

Contexte stratigraphique, lithologique, tectonique, hydrologique (débits,...)

Consultation des données si traçage(s) antérieur(s). Bien noter les conditions météohydrologiques des expériences précédentes et évaluer leur degré de fiabilité (traceur adapté en quantité et qualité, modalités de surveillance satisfaisantes, quel protocole d'analyse etc. ?)

### **2. Contact avec les propriétaires (commune, particuliers...), utilisateurs et administrations concernées**

Diffusion d'une circulaire d'information, demandes d'autorisation, voire de financements.

### **3. Choix et acquisition des traceurs, choix du niveau de surveillance**

a) Les critères de choix sont le degré de toxicité, la couleur souhaitée (si risque d'effrayer les riverains ou consommateurs : le vert fluo. est un peu mieux toléré que le rose framboise !), le niveau de risque d'adsorption (fixation) du colorant par des matériaux argileux tapissant les drains, le coût et l'accessibilité...

Les traceurs artificiels doivent être conformes aux exigences les plus divers pour répondre aux besoins de l'hydrologie des traceurs. En hydrogéologie, le traceur idéal doit être représentatif du mouvement de l'eau, c'est-à-dire que son comportement à l'écoulement doit s'approcher de celui de l'eau elle-même. Pour cela, les propriétés suivantes sont requises :

- Stabilité chimique ;
- Tendance à l'adsorption la plus faible possible
- Bonne solubilité à l'eau

A cela s'ajoutent quelques conditions pratiques importantes :

- Innocuité pour l'être humain, les animaux et les plantes ;
- Limite de détection basse ;
- Coût peu élevé (traceur et analyse) ;
- Quantification aisée ;
- Pas ou peu de charge polluante pour les eaux.

b) Selon les moyens disponibles et le but poursuivi (apporter la preuve d'une liaison ou connaître les modalités de transfert de l'eau et la configuration de l'aquifère), on peut mettre en œuvre plusieurs niveaux de surveillance :

- **Niveau 1** : simple surveillance visuelle, permanente ou sporadique. Précautions : choisir un observateur expérimenté qui a déjà assisté à une restitution du traceur employé. Limites et inconvénients : la coloration peut être positive mais invisible à l'œil nu en raison de la faiblesse des concentrations. Il faut donc injecter une masse importante de traceur.

- **Niveau 2** : surveillance visuelle + pose de fluocapteurs aux émergences ou points de passage surveillés. Niveau suffisant si l'on veut simplement prouver une liaison hydrogéologique, à condition de respecter certaines précautions pour que les fluocapteurs jouent pleinement leur rôle et pour éviter de les contaminer et de fausser ainsi le résultat.

- **Niveau 3** : idem que niveau 2 mais les fluocapteurs sont régulièrement renouvelés pour être analysés. On entre ici dans le domaine de l'analyse quantitative qui nous permet d'obtenir une courbe de restitution du traceur à partir de la détermination au spectrofluorimètre des concentrations en colorant absorbé par chaque fluocapteur. Inconvénient : analyses coûteuses à confier à un laboratoire spécialisé.

- **Niveau 4** : surveillance par échantillonnages d'eau régulièrement espacés.

Par sécurité et pour éviter de tout perdre en cas de panne, il est nécessaire de placer des fluocapteurs "en doublure". Inconvénient : difficultés de se procurer un préleveur automatique, multiplication d'analyses coûteuses. Il est nécessaire de travailler avec des partenaires assurant un soutien logistique et financier.

#### 4. Visite sur le terrain

La visite sur le terrain est nécessaire pour la préparation pratique de l'essai. Elle doit englober les aspects suivants :

##### **Reconnaissance des points d'injection;**

- ❖ Contrôle de la pertinence des points prévus pour l'injection de traceurs ;
- ❖ Accessibilité (aussi dans l'optique de possibles dommages à terrain);
- ❖ Vérification de la possibilité d'amener la quantité nécessaire d'eau pour le rinçage avant et après l'injection.

##### **Reconnaissance et préparation des points d'échantillonnage ;**

- ❖ Définition des points exacts d'échantillonnage : p. ex. dans les captages, il faut s'assurer que l'on puisse prélever de l'eau brute, en amont d'un éventuel traitement (chloration ou autre);
- ❖ Contrôle du bon fonctionnement des piézomètres. Les piézomètres bouchés doivent être assainis ;
- ❖ Vérification des dispositifs de mesure de niveaux d'eau, de débits de puits ou de source ;
- ❖ Rencontre et instruction du personnel chargé de l'échantillonnage ;
- ❖ Définition de la fréquence d'échantillonnage ;
- ❖ Reconnaissance du local dans lequel les échantillons peuvent être entreposés (local sombre) ;
- ❖ Vérification de l'absence de risque de contamination ou de confusion d'échantillons ;
- ❖ Prélèvement des premiers blancs.

### 5. Evaluation des risques

Des effets secondaires indésirables peuvent survenir lors des essais de traçage. Des colorations de l'eau potable suscitent en général des réactions fâcheuses. Il faut aussi être prudent en ce qui concerne les concentrations de traceur maximales tolérables dans l'eau industrielle s'il y a des exploitations sensibles (p. ex. industrie textile ou du papier). Dans certains cas, il vaut la peine d'effectuer une évaluation des risques possibles dus à un essai de traçage. Il faut alors considérer en premier lieu les aspects suivants :

- ☐ Coloration d'eaux industrielles ou de produits dans les exploitations sensibles;
- ☐ Coloration de l'eau potable;
- ☐ Coloration des eaux de surface.

### 6. Evaluation du temps de transit probable

Pour fixer la durée de la période d'échantillonnage, il est nécessaire d'évaluer le temps de transit probable du traceur entre le point d'injection et les points d'échantillonnage. La démarche la plus adéquate dépend du contexte hydrogéologique.

Dans les aquifères en roche meuble, on obtient une estimation grossière du temps de transit en utilisant la formule de Darcy

$$V = \frac{K \cdot i}{n_e}$$

**V** = Vitesse moyenne en ligne droite [m/s]

**K** = perméabilité [m/s]

**i** = gradient hydraulique

**n<sub>e</sub>** = porosité efficace de l'aquifère

En appliquant cette formule, il faut garder à l'esprit qu'en raison des hétérogénéités de l'aquifère, la vitesse maximale en ligne droite est souvent 2 à 4 fois plus élevée que la vitesse moyenne calculée. Dans certains cas, la vitesse maximale peut être 10 fois plus grande que la vitesse moyenne.

### 7. Mesures de débits et des paramètres physico-chimiques des eaux aux sources (impératives si l'on veut travailler en quantitatif)

**a)** Il existe différentes méthodes pas forcément lourdes pour mesurer (approximativement) le débit des sources, citons celles principalement utilisables par des spéléos en terrain accidenté ou reculé:

- **Le seau à capacité jaugée** : pour les petits débits (jusqu'à 10 ou 20 l/s), notamment les griffons (source "éclatée" en plusieurs points d'émergence, sorties d'eau secondaires à proximité d'un émissaire principal, petit trop plein de captage...).

- **La technique du flotteur** : donne des résultats peu précis, mais ne nécessite pas de matériel spécifique autre qu'un chronomètre, le flotteur pouvant être confectionné avec les moyens du bord.

- **Méthode du seuil - déversoir** : naturel ou artificiel, en place ou édifié pour la circonstance.

- **Les mesures au (micro-)moulinet** : méthode la plus rigoureuse pour les cours d'eau inscrits dans un lit bien défini. Il faut se procurer un (micro-) moulinet à moindres frais.

- **Jaugeage chimique** : pour les cours d'eau tumultueux dont le lit est encombré et trop irrégulier (voir cours jaugeage chimique).

**b)** Il est utile de mesurer sur place pour chaque source : température, PH, conductivité et/ou dureté et alcalinité. On peut aussi prendre des échantillons d'eau pour des analyses (payantes) plus poussées et précises confiés à des laboratoires spécialisés.

### III – INJECTION

Les traceurs sont généralement fournis sous forme de poudre assez volatile. Nous conseillons d'amener le traceur au point d'injection sous forme d'une solution préalablement préparée. Pour minimiser les risques de pollution des échantillons prélevés, la pré-dissolution des traceurs doit s'effectuer dans des lieux adaptés, et éloignés du lieu de stockage des flacons d'échantillonnage. Pour une bonne mise en solution, il faut respecter les rapports de dilution qui diffèrent d'un traceur à l'autre. Les personnes chargées de l'injection ne doivent aucunement être en contact avec le matériel de surveillance.



**Photo 1 : Installation pour la préparation de la solution concentrée d'acide amino G. Mélange de l'acide amino G en poudre (2 x 25 kg) dans les bidons**



**Photo 2 : Mélange de l'acide amino G en poudre (2 x 25 kg) dans les bidons**

**Photo 3 : Mélange de l'acide amino G en poudre (2 x 25 kg) dans les bidons**



**Photos prises lors des 3 injections du multitraçage KarstEAU 2011.**

La manière d'injecter le traceur doit être adaptée à la problématique posée et aux méthodes prévues pour le dépouillement et l'interprétation des données.

- ❖ Comme dispositif standard, on recommande l'injection ponctuelle et instantanée du traceur dans la zone saturée. De nombreuses méthodes d'interprétation supposent en effet ce mode d'injection comme fonction d'entrée ;
- ❖ Dans les régions karstiques, on ne peut souvent pas atteindre directement la zone saturée. Dans ce cas, l'injection peut avoir lieu dans la perte d'un cours d'eau ou dans une doline. Elle doit alors être suivie d'un vigoureux rinçage;



**Photo 4 : L'entrée de l'embut sud-ouest – Tuyau (75 mm diamètre) d'injection installé en sortie.**



**Photo 5 : Injection de l'acide amino G en solution à partir de l'entrée de l'embut**



Photo 6 : Camions pompiers apportant l'eau (14 + 6 m<sup>3</sup>) pour la "chasse" de la solution d'acide amino G injectée

**Photos prises lors des 3 injections du multitraçage KarstEAU 2011.**

- ❖ On ne devrait effectuer une injection en zone non saturée que dans les cas où la reconnaissance des cheminements dans la zone non saturée est le sujet même de l'investigation, ou dans les cas où une injection directe dans l'eau souterraine n'est pas possible à cause de conditions particulières.



**Injection d'un traceur dans la zone non saturée**

**1. Choix des quantités à injecter**

La définition correcte de la quantité de traceur à injecter est extrêmement importante pour la réussite d'un essai de traçage. Une quantité trop faible peut mettre en péril le succès de l'essai, tandis qu'une quantité trop forte apporte une charge inutile sur les eaux et peut contaminer pour longtemps un aquifère avec le traceur. Pour déterminer la juste quantité de traceur à injecter, il faut tenir compte de toute une série de facteurs.

**Modèle conceptuel hydrogéologique :** Suivant le type d'aquifère, il faut calculer différemment les quantités de traceur à injecter.

**Distance de transit :** Quelles sont les distances entre le point d'injection et les points d'observation.

**Choix du traceur et concentration maximale :** On recommande de viser une concentration maximale de restitution de 10 ppb pour les traceurs fluorescents.

**Concentrations présentes avant l'essai :** Y-t-il aux points d'observation un bruit de fond (présence détectable).

**Adsorption et dégradation :** Faut-il s'attendre à des processus d'adsorption ou de dégradation du traceur dans l'aquifère? Des composantes argileux ou organiques, ainsi qu'un pH bas, peuvent engendrer un accroissement des pertes par adsorption et dégradation.

**Mode d'injection du traceur :** Où aura lieu l'injection de traceur ?

**Exécution pratique :** Le traceur ainsi que l'eau de rinçage peuvent-ils être transportés sur le lieu d'injection ?

**Conditions hydrologiques :** Sous quelles conditions météorologiques l'essai doit-il être effectué ? (hautes ou basses eaux).

## 2. Calcul de la masse à injecter et préparation du ou des traceurs

La masse de traceur à injecter se calcule en fonction des volumes d'eau (cf. mesures de débits) et de la distance entre le point d'injection et les exutoires supposés, et en fonction du résultat que l'on veut obtenir (restitution visible à l'oeil nu ou pas, sans danger pour tel type de faune particulier etc.). Il existe une méthode de calcul, permettant d'obtenir la masse de traceur restituée à l'émergence si l'on connaît le débit de la source (Q), la concentration du colorant désirée (C : prendre par exemple le seuil limite de détection à l'oeil nu soit 0,1 g/m<sup>3</sup> c'est-à-dire 100 micro-grammes/l ou encore 0,1 mg/l d'après MATHEY, 1971). Il faut également avoir une idée de la valeur locale de la distribution des temps de séjour du traceur dans les drains (la "DTS", exprimée en %/s), ce qui est beaucoup moins évident, puisque c'est le plus souvent un des paramètres que l'on cherche à obtenir par le traçage... La formule de calcul est la suivante : la masse de traceur restituée M (la masse de traceur à injecter sera prise légèrement plus grande par sécurité pour tenir compte des éventuelles rétentions par le milieu) sera égale au produit du débit Q de la source par la concentration désirée C, le tout divisé par la valeur moyenne de la DTS :

$$M = (Q \cdot C) / DTS$$

Dans la plupart des cas, cette formule n'est pas utilisable, faute d'avoir toutes les données nécessaires. Elle peut alors avantageusement être remplacée par une formule adaptée qui est la suivante (in GAGNAGE et BRECHON, 1993)

:

$$M = Q \cdot C \cdot (3600 \cdot D)$$

où D est la durée souhaitée de la restitution (en heures). Avec Q et C en l/s et g/l ou Q et C en m<sup>3</sup>/s et g/m<sup>3</sup>.

On peut également recourir à la formule de Ravier - Hours - Schneebli (in MATHEY, 1971), qui se heurte cependant au même problème. Mais les estimations pour les données inconnues sont plus facilement réalisables :

$$M = 0,5 \cdot (Q \cdot L / v) + 0,02 \cdot V$$

où L = distance en m à vol d'oiseau entre points d'injection et de restitution, v = vitesse du courant souterrain estimée en m/jour, V = volume des eaux souterraines en milliers de m<sup>3</sup>.

On peut plus simplement appliquer un principe empirique et commode, qui fait généralement ses preuves si on veut une restitution visible à l'oeil nu ou au moins par analyse de fluocapteurs.

Il s'agit de la règle du "1 pour 1" : 1 kg de traceur pour 1 km de parcours souterrain à vol d'oiseau. (additifs R. LAURENT, 1989 : sur MATHEY, 1971). Valeur à moduler bien sûr en fonction des débits et des réserves potentielles.

Une autre formule simple présentée ci-dessous est basée sur des recommandations de KASS (1992), WERNLI (1994) et WORTHINGTON (2001). Cette formule permet de définir des ordres de grandeur et de contrôler la plausibilité des quantités envisagées:

$$M = \alpha \cdot L \cdot A$$

M: Masse injectée (g)

a: Facteur de correction du traceur (g/m)

L: Distance (m)

A: Facteur d'ajustement aux conditions de l'aquifère



Tableau 1 : Facteurs de correction  $\alpha$  des traceurs (g/m) (Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapport de l'OFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)

Traceurs fluorescents	$\alpha$	Sels	$\alpha$	Particules	$\alpha$
Uranine	1	Chlorure de sodium NaCl	$10^4$	Phages (nombre)	$10^{12}$
Eosine	2 à 3	Bromure de potassium KBr	$3 \cdot 10^3$ à $5 \cdot 10^3$	Microsphères (nombre)	$10^{12}$
Amidorhodamine G	2	Chlorure de lithium LiCl	$10^3$		
Sulforhodamine B	4				
Pyranine	5				
Naphthionate	15				
Tinopal	25				
Duasyne	4				

Tableau 2 : Facteur A d'ajustement de la masse à injecter pour différents types d'aquifère (Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapport de l'OFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)

Aquifère à porosité d'interstices	Aquifère fissuré	Aquifère karstique
perméabilité $K > 10^{-3}$ m/s : $A = 0.25 \cdot \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$	en général : $A = 0.2 - 2$	en général : $A = 0.2 - 1$
perméabilité $K$ entre $10^{-3}$ et $10^{-4}$ m/s : $A = 0.5 \cdot \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$	pour un angle de propagation probable de plus de $60^\circ$ : $A = 2 - 4$	si liaison karstique d'une perte de cours d'eau vers la source : $A = 10 \cdot (Q/100)^{0.93}$ (Q : débit de la source en $\text{m}^3/\text{s}$ )
perméabilité $K < 10^{-4}$ : $A = \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$		

#### IV - SURVEILLANCE DE LA RESTITUTION

##### 1. Présence d'observateurs directs

Quel que soit le niveau de surveillance adopté, il est nécessaire d'assurer une présence physique sur le terrain pour effectuer des prélèvements d'eau, remplacer des fluocapteurs ou s'assurer qu'ils n'ont pas été emportés ou qu'ils ne sont pas mis hors d'eau par une diminution du débit.

Un préleveur automatique doit être surveillé (risque de vol, de vandalisme ou de panne) et les flacons régulièrement renouvelés (en fonction de l'intervalle de temps choisi entre deux prélèvements).

##### 2. Chronique détaillée

Bien tenir une chronique détaillée des opérations et un référencement clair des échantillons.

Toujours noter les paramètres météo. Et hydrologiques au moment des visites ou lorsque surviennent des phénomènes marquants (orage, redoux, grand froid...)

##### 3. Précautions lors des prélèvements

- Tout échantillon ou fluocapteur doit être stocké à l'abri de l'air, de la lumière et de la chaleur.
- Lors des prélèvements ou des manipulations ultérieures, prendre toute précaution contre les contaminations d'échantillons par d'autres échantillons (via les mains en général, parfois les bottes lorsqu'elles ont pataugé dans une source colorée avant de piétiner les fluocapteurs de la source voisine...).



Photos prises lors des prélèvements d'eau sur le terrain et des analyses au laboratoire  
KarstEAU 2011

## V - ANALYSE ET INTERPRETATION DU TRACAGE

### 1- Principaux résultats et possibilités d'application des essais de traçage

Le tableau suivant résume et commente les principaux résultats-types obtenus par des essais de traçage. Il faut savoir que de nombreux facteurs tels que la quantité injectée, la limite de détection ou la fréquence d'échantillonnage peuvent fausser le temps de transit minimal observé. De cas en cas, on décidera si la première apparition doit être déterminée au moyen d'un modèle de transport à partir des données mesurées.

Résultat ou paramètre	Commentaire	Exemple d'application
<b>Détection d'une relation hydrologique entre deux points</b>	la preuve d'une relation hydrologique est le résultat le plus simple de l'interprétation d'un essai de traçage. Il s'agit alors uniquement de savoir si le traceur a pu ou non être détecté au point d'échantillonnage.	-Délimitation de bassins d'alimentation de captages; -Sites contaminés/décharges: contrôle de la bonne localisation de points de surveillance ; -Infiltrats : vérification de la présence dans l'eau souterraine d'infiltration d'eaux de surface ou de fuites de conduites; -Evaluation de dommages: preuve d'exfiltration d'eaux de versants dans des bâtiments et constructions.
<b>Traceur non détecté en un point d'échantillonnage</b>	En cas de résultat négatif, on ne peut pas exclure une liaison hydraulique entre le point d'injection et le point d'échantillonnage.	Si l'essai a été effectué dans de bonnes conditions et avec suffisamment d'expérience, il sera au moins possible d'exclure une liaison hydraulique préférentielle, bien développée.
<b>Temps de transit minimal ou vitesse à vol d'oiseau</b> $t_{1^{\text{ère apparition}}}$ , $V_{\text{max}}$	Ces deux valeurs sont déterminées par la première du traceur au point d'échantillonnage.	Scénarios d'incident ou de dommage : détermination du temps d'intervention.
<b>Temps de transit de pic ou vitesse de transit de pic</b> $t_{\text{pic}}$ , $V_{\text{pic}}$	Ces deux valeurs sont déterminées par le temps nécessaire à l'apparition du maximum de concentration.	-Zones de protection : détermination de l'isochrone des dix jours; -Surveillance de la qualité des eaux souterraines: optimisation de la fréquence des observations en aval de chantiers pouvant menacer les eaux souterraines.
<b>Temps de transit moyen ou vitesse moyenne à vol d'oiseau</b> $t_{\text{moy}}$ , $V_{\text{moy}}$	Moyenne de toutes les vitesses mesurées sur l'ensemble du nuage de traceur.	-Calibration et vérification de modèles d'écoulement et de transport; -Calcul de conductivités hydrauliques.
<b>Dispersivité <math>\alpha</math></b>	La dispersivité est un paramètre de l'aquifère décrivant le processus de mélange de différentes lignes d'écoulement dans l'aquifère (mesure de la dispersion du nuage de traceur, (voir le TD)	-Grandeur nécessaire pour la description mathématique du transport de masse en solution (suivant les cas transformée en coefficient de dispersion. paramètre de dispersion ou nombre de Péclet)
<b>Taux de restitution R(%)</b>	Le taux de restitution se calcule par le rapport de la quantité totale de traceur retrouvée au point d'échantillonnage sur la quantité injectée (le débit ou le volume pompé doit être connu).	-Fournit des indications sur la pertinence d'essai de traçage.

### 2- Généralités sur le transport de masse en solution

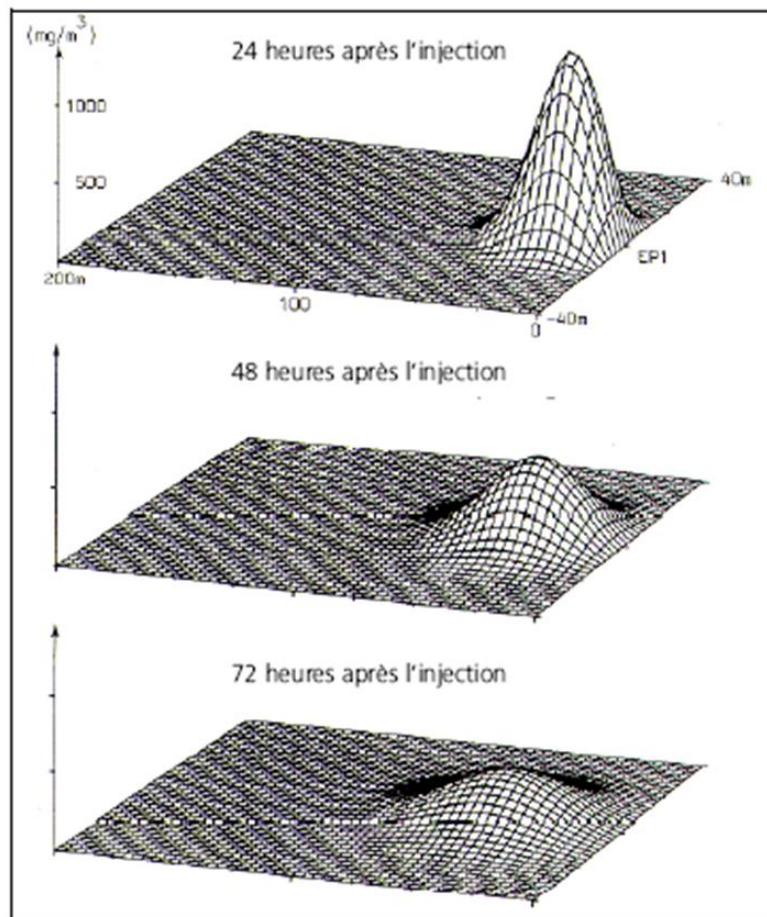
Un traceur dissous dans l'eau souterraine est soumis aux processus suivants:

- ☐ Transport convectif provoqué par l'écoulement de l'eau souterraine;



- ❑ Dispersion, c'est-à-dire étalement du « nuage de traceur » en raison de la dispersion cinématique ;
- ❑ Eventuellement processus d'échange par diffusion entre l'eau mobile et l'eau immobile dans les milieux à double porosité (milieux fissuré et karstique, zone non saturée) ;
- ❑ Eventuellement adsorption et désorption sur les éléments du tissu granulaire ;
- ❑ Eventuellement dégradation du traceur par des processus microbiologiques ou chimiques.

La figure illustre la combinaison des effets de la convection et de la dispersion (dans les directions longitudinale et transversale) au moyen de trois états de la propagation d'un traceur (selon une modélisation). On remarquera l'étalement prononcé du traceur dû à la dispersion. Il en résulte une diminution rapide des concentrations maximales,



**Représentation tridimensionnelle de la distribution d'un traceur à trois moments différents après l'injection (résultats d'une modélisation).**

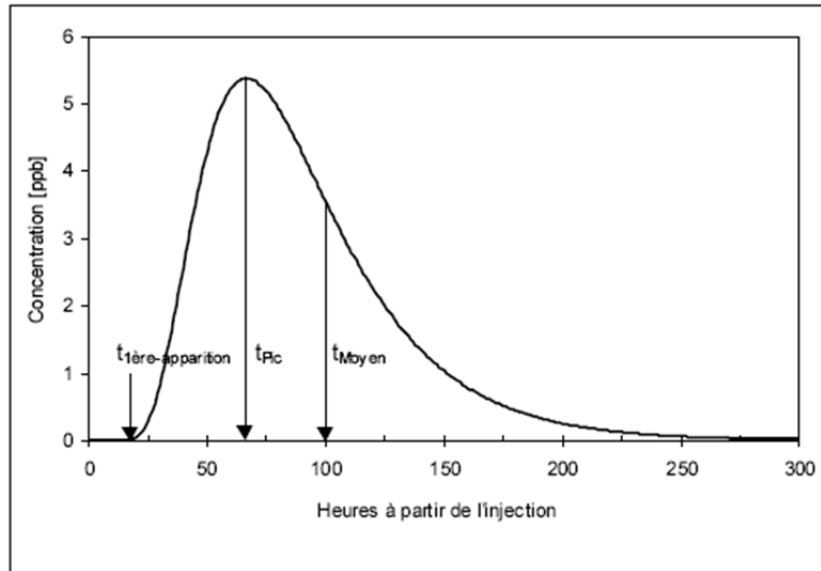
(Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH - Rapport de l'OFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)

### 3- La restitution et l'interprétation d'un traçage

Après chaque traçage et analyse des traceurs, les hydrogéologues réalisent généralement une courbe de restitution du traceur. Elle représente la concentration en traceur mesurée au point d'observation, en fonction du temps à partir de l'injection. Il est possible ensuite de réaliser des courbes de restitution cumulée, de calculer le temps de transit ou le taux de restitution.

Pour les procédés d'interprétation qui suivent, il est admis que les traceurs ont des propriétés idéales. Ils se comportent dans l'aquifère comme l'eau en écoulement. Il n'y a pas de processus d'adsorption ni de filtration. Il n'y a pas de réaction qui conduisent à une dégradation. De plus, un déroulement idéal de l'essai est admis, remplissant avant tout, les conditions suivantes

- La quantité de traceur injectée est transportée en totalité par le courant naturel de l'eau souterraine ;
- Le passage du traceur au point d'observation est mesuré complètement.



$t_{1^{ère}\text{-apparition}}$	Temps de transit minimum
$t_{Pic}$	Temps de transit du pic (aussi dit temps de transit dominant ou efficace)
$t_{Moyen}$	Temps de transit moyen

**Exemple de courbe de restitution d'un traceur**  
**(Guide pratique - Groupe de travail Traçage, de la société Suisse d'hydrogéologie SSH -**  
**Rapport de l'OFEG, Série Géologie N°3 - Berne, 2002.)**

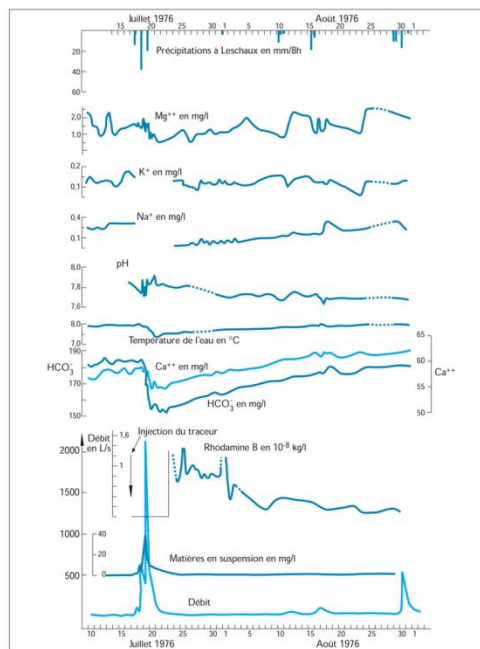
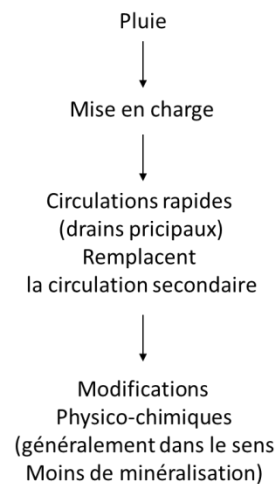


Figure 11 - Variations des principaux paramètres à l'exutoire du système de Bange-Eau Morte (Savoie) en juillet et août 76 (M. Lepillier - 1980)



**Variation des principaux paramètres à l'exutoire du système de Bange. Eau Morte (Savoie) en**  
**Juillet et Aout (M. Lepillier, 1980)**

## Jaugeage par dilution chimique

### 1. Principe

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) recommande dans son "*Guide to Hydrometeorological Practices*" ce type de jaugeage à chaque fois que les méthodes conventionnelles ne pourraient être employées au site considéré (cas des profondeurs faibles et cas des écoulements torrentiels etc.).

Le principe du traçage par injection instantanée consiste à effectuer un bilan de masse: la masse de traceur injectée en amont d'un tronçon sur lequel on veut mesurer un débit  $Q$  doit être égale à la masse de traceur déterminée en aval, en mesurant la concentration  $C$  (t) en traceur, après dilution dans l'écoulement et propagation dans le tronçon.

### 2. Critères de choix

#### 2.1 Choix du traceur

En hydrologie urbaine, les traceurs chimiques ou colorés sont les plus utilisés.

Un traceur doit satisfaire les critères suivants :

- ne pas être naturellement présent dans l'écoulement (ou présent en faible et constante quantité : il faut donc déterminer le bruit de fond) ;
- se mélanger facilement à l'eau ;
- être stable durant la durée du traçage (la teneur en sel varie en temps de pluie) ;
- être mesurable par un capteur en temps réel (moins onéreux que les analyses avec prélèvements et surtout visualisation sur site des résultats) ;
- être d'un coût aussi faible que possible pour pouvoir être utilisé en grande quantité.

En tenant compte de tous les critères, deux traceurs apparaissent comme les plus appropriés :

- le chlorure de sodium NaCl pour le temps sec,
- la Rhodamine WT pour le temps de pluie, avec des mesures à un pas de temps fin de l'ordre de la seconde.

Un traçage avec des échantillons prélevés à des pas de temps plus longs (30 secondes) est moins précis.

#### 2.2 Méthode de traçage et types d'injection

- **La méthode par dilution** consiste à injecter en une seule fois (**injection instantanée**) ou en continu (**à débit constant**) une solution de traceur à l'amont, et à mesurer en un point à l'aval les variations de concentration du traceur au cours du temps.

$$qC_1 = (Q+q) C_2$$

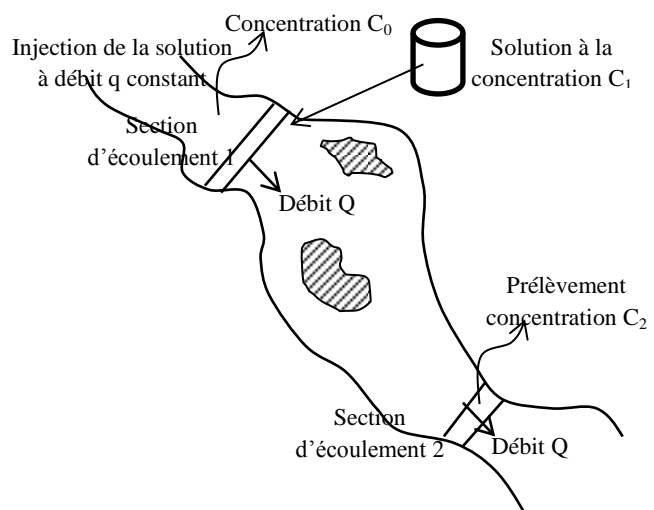
$$\rightarrow Q = q(C_1/C_2)$$

$Q$  : Débit du cours d'eau

$q$  : Débit de la solution mère

$C_1$  : Concentration de la solution mère

$C_2$  : Concentration du traceur à la section de prélèvement



### 3. Précautions

Le tronçon de mesure doit répondre aux critères suivants:

- ne pas présenter d'arrivée ou de fuite du traceur (branchements, noeuds,...) ;
- permettre un bon mélange et une concentration homogène du traceur, avec des vitesses d'écoulement suffisamment élevées et une turbulence importante (éviter les zones mortes).

#### 3.1 Bruit de fond

Si le traceur est présent dans l'écoulement à la concentration supposée constante pendant la durée des mesures, il faut soustraire ce bruit de fond à la concentration mesurée. La moyenne des concentrations mesurées du traceur pendant plusieurs minutes, en enlevant les valeurs aberrantes, avant et après le traçage, permet d'estimer le bruit de fond.

Il faut que le pic de concentration du traçage soit au moins 3 fois supérieur au bruit de fond, dans la limite de la gamme de mesure de l'appareil (fluorimètre, conductimètre, ...).

#### 3.2 Distance de bon mélange

La distance de bon mélange est atteinte lorsque la concentration de traceur est homogène à travers toute la section de mesure. Selon la nature du courant, les ordres de grandeur des distances de bon brassage sont, selon André, reportés au tableau suivant.

**Tableau 3 : Distance de bon brassage en fonction de la largeur de la section d'écoulement**

B (m)	0 - 10	10 - 50	50 - 200
L (m)	50 - 500	500 - 2500	2500 - 15000

### 4. Détails de la méthode de traçage par dilution avec injection instantanée : vérification du débit et des vitesses avec le calcul des incertitudes

#### 4.1 Principe

La méthode de dilution avec injection instantanée est la plus simple à mettre en œuvre, avec les hypothèses suivantes:

- le débit  $Q$  est supposé constant dans le tronçon de mesure pendant toute la durée du traçage (bien choisir le lieu et la plage horaire en temps sec);
- la masse  $M$  de traceur est conservée, ce qui permet d'écrire :

$$M = C_0 V_0 = Q \int_{t_{AR}}^{t_{AR} + T_p} C(t) dt$$

Avec :

$M$  masse de traceur introduite dans l'écoulement (kg ou g)

$C_0$  concentration initiale en traceur (kg/m<sup>3</sup> ou g/L)

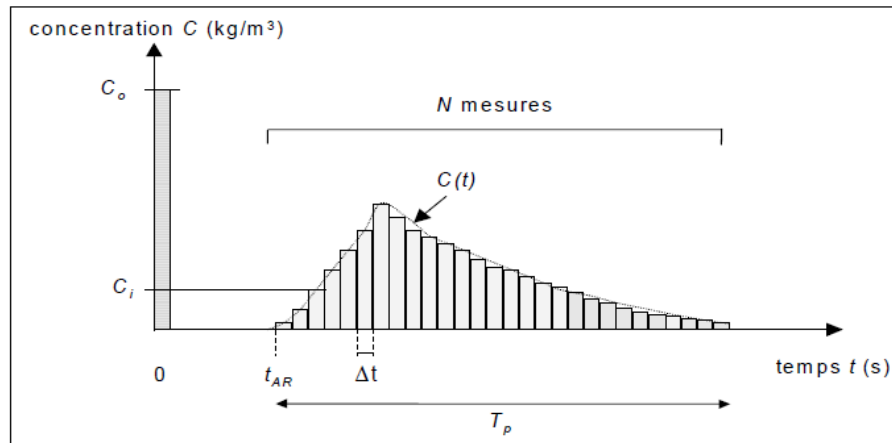
$V_0$  volume injecté (m<sup>3</sup> ou L)

$Q$  débit à mesurer (m<sup>3</sup>/s ou L/s)

$C(t)$  concentration dans la section de mesure (kg/m<sup>3</sup> ou g/L)

$t_{AR}$  instant de l'arrivée du traceur dans la section de mesure (s)

$T_p$ , durée de passage du traceur dans la section de mesure (s).



**Figure 1** : traçage par injection instantanée

On applique la version discrétisée de l'équation précédente :

$$Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i C_i} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i (C_i - C_n)} \quad \text{avec un bruit de fond}$$

Avec :

Q débit à mesurer (m<sup>3</sup>/s ou L/s)

M masse de traceur introduite dans l'écoulement (kg ou g)

Δt pas de temps du système d'acquisition de la concentration (s)

C<sub>i</sub> concentrations à chaque pas de temps i lors du passage du traceur (mg/L)

C<sub>n</sub> concentration avant et après le passage du traceur = bruit de fond (mg/L).

Le traceur le plus facile et le moins coûteux à utiliser est le chlorure de sodium (NaCl).

#### 4.2. Ordre de grandeur de la masse de traceur à injecter:

On peut estimer la masse M<sub>INJ</sub> de traceur à injecter dans l'écoulement à partir de plusieurs paramètres, avec la formule suivante :

$$M_{INJ} = \frac{C_{MAX} S \sqrt{4 \pi K_X t_{CMAX}}}{e^{\left( -\frac{(x - Ut_{CMAX})^2}{4 K_X t_{CMAX}} \right)}}$$

On peut utiliser pour valeur du coefficient de dispersion longitudinale  $K_x = 6h\sqrt{ghI}$

Avec :

M masse de traceur à injecter (g)

C max concentration maximale que l'on souhaite mesurer (g/m<sup>3</sup>)

S section de l'écoulement (m<sup>2</sup>)

h hauteur d'eau dans l'écoulement (m)

g accélération de la pesanteur (= 9.81 m.s<sup>-2</sup>)

I pente du radier (m/m)

x distance depuis le point d'injection (m)

t<sub>CMAX</sub> le temps de passage du traceur (s)

U vitesse estimée dans l'écoulement (m/s).

## Références

- Beloulou. L., 2015. Note de cours Hydrologie Fondamentale avec exercices d'application. Univ Anaba.
- Bruno Arfib, Thierry Lamarque., 2012. Résultats préliminaires et premières interprétations du traçage KARSTEAU du 08 février 2011 par injection de Sulforhodamine B à la perte de Mauregard (Ceyreste) (version du 09/02/2012) Résultats positifs sur les sources sous-marines de la baie de Cassis : Bestouan et Port Miou.
- Dörfliçer. N., 2010. Guide méthodologique Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. BRGM/RP-58237-FR.
- Etcheverry. D., 2002. Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. Berichte des BWG, Serie Geologie – Rapports de l'OFEG, Série Géologie – Rapport dell'UFAEG, Serie Geologica N° 2 – Berne 2002
- Hoblea. F., 1994. Methode De Réalisation D'un Tracage Application Au Massif Du GRANIER. Stage Scientifique du CSRRA Granier.
- Thibault Mathevet, 2002. Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange-L'eau-Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts
- Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie Berichte des BWG, Serie Geologie - Rapports de l'OFEG, Série Géologie - Rapport dell' UFAEG, Serie Geologica N° 3 - Berne, 2002