

Chapitre 5 : pollution des eaux

Introduction : L'eau au contact des terrains qu'elle rencontre, se charge en divers éléments qui vont influencer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau brute. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir : des matières organiques, des matières dissoutes provenant des terrains traversés, des particules en suspension. D'autres éléments sont d'origine anthropique. La qualité des eaux continentales est dépendante d'un certain nombre de paramètres, dont la quantité en présence (concentration en éléments traces) va définir l'état de la qualité de l'eau. Paramètres chimiques

Les principaux paramètres analysés dans l'eau sont :

- Paramètres organoleptiques : couleur, turbidité, odeur et la saveur
- Paramètres physicochimiques en relation avec la structure naturelle des eaux : température, pH, conductivité, chlorures, sulfates, silice, calcium, magnésium, sodium, potassium, aluminium, résidus secs, oxygène dissous, l'alcalinité (titre alcalimétrique (T.A), titre alcalimétrique complet (T.A.C.)) et la dureté (TH).
- Paramètres concernant des substances indésirables : nitrates, nitrites, ammonium, bore, fer, manganèse, cuivre, zinc, phosphate, argent, fluor, Baryum...
- Paramètres concernant des substances toxiques : arsenic, cadmium, cyanures, chrome, mercure, nickel, plomb...

1. Paramètres organoleptique

1.1 Couleur : La couleur de l'eau due à la présence de matières organique colorées (substances humiques) de métaux ou rejets industriels. Les métaux qui colorent l'eau sont notamment le fer (couleur rouge), qui provient soit de la composition naturelle de l'eau soit de la dissolution des tuyauteries métalliques des réseaux de distribution, et le manganèse (couleur noire). Dans les cas extrêmes, une coloration bleu clair peut apparaître en présence de cuivre.

1.2 Turbidité : La turbidité de l'eau a pour origine la présence de matières en suspension (argile, limons, particules fibreuses, particules organiques colloïdales, plancton, organismes microscopiques) qui donnent un aspect trouble à l'eau.

1.3 Odeur : Il a pour origine la présence de substances organiques volatiles ou de certains gaz

1.4 Saveur : L'apparition de goût provient d'une croissance de micro-organismes ou des éléments minérales qui se trouvent dans l'eau (saveur métallique (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+}), saveur salée (Na^+ , Cl^-) saveur magnésienne, saveur bicarbonaté...).

2. Principaux paramètres physico-chimiques et chimiques mesurables

2.1. Température : La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius (°C). L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît. La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets d'eaux résiduelles chaudes. Des changements brusques de température de plus de 3° C s'avèrent souvent néfastes.

2.2. pH : Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H^+). L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons. Généralement, on admet qu'un pH naturel situé entre 6,5 et 8,5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale.

2.3. Conductivité électrique (EC) : La conductivité électrique (EC) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètre (mS/m) à 20 °C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 $\mu S/cm$.

L'estimation de la quantité totale de matières dissoutes peut être obtenue par la multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau. La connaissance du contenu en sels dissous est importante dans la mesure où chaque organisme aquatique a des exigences propres en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne supportent généralement pas des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observées par exemple en cas de déversements d'eaux usées.

2.4. Potentiel redox (Eh) : Dans les systèmes aqueux, le potentiel redox (ou disponibilité en électrons) affecte les états d'oxydation des éléments (H, C, N, O, S, Fe...). Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène diminuent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox. Dans les eaux naturelles, des comparaisons relatives de l'évolution du potentiel redox peuvent être utiles pour suivre les degrés de changement du système aquatique. Le potentiel redox se mesure en mV.

2.5. Matières en suspension (MES) : Les matières en suspension comprennent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes de l'eau. La quantité de matières en suspension varie notamment selon les saisons et le régime d'écoulement des eaux.

Ces matières affectent la transparence de l'eau et diminuent la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse. Elles peuvent également gêner la respiration des poissons. Par ailleurs, les matières en suspension peuvent accumuler des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques...). Les matières en suspensions sont exprimées en mg/l.

2.6. Hydrocarbures : Ce terme fait la plupart du temps référence aux huiles minérales qui comportent des substances telles que les alcanes, les alcènes, etc. Outre leur toxicité, ces substances peuvent limiter l'apport d'oxygène dans les eaux de surface lorsqu'elles sont présentes en concentrations élevées. Ces polluants incluent également les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM). Les HAP sont des combinaisons organiques résultant de l'assemblage de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés sont relativement stables et peu solubles dans l'eau. Ils s'adsorbent fortement aux sols et aux matières en suspension et sont, en outre, très solubles dans les graisses ce qui favorise leur bioaccumulation dans les tissus humains et animaux. Plusieurs HAP sont classés comme agents cancérigènes possibles par l'OMS. Les HAM incluent des polluants comme le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène dont les impacts sur la santé peuvent être très importants (diminution de la réponse immunitaire, effet neurotoxique, irritation des voies respiratoires...).

2.7. Eléments en solution : Les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}) font généralement l'objet d'un suivi particulier. Une forte teneur en chlorures peut indiquer une pollution par des eaux usées domestiques (sels régénérants utilisés dans les lave-vaisselles) ou par certaines eaux usées industrielles. Les pics de concentration en chlorures s'observent le plus souvent en période de gel (sels de déneigement). Les eaux usées de nombreuses industries peuvent également contenir des sulfates. Ce sont surtout les changements brusques et importants des teneurs en chlorures et sulfates qui se révèlent néfastes. D'autres ions tels que le calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+), fluor (F^-) peuvent être également mesurés. Les éléments en solution sont exprimés en mg/l.

2.8. Dureté de l'eau (ou titre hydrométrique) : La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et H^+ . Elle est souvent due aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 par litre.

2.9. Oxygène dissous (OD) et % de saturation en oxygène : Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec les valeurs de pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau.

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande :

- Une valeur inférieure à 1 mg d'O₂ par litre indique un état proche de l'anaérobie. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments.
- Une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique une rivière fortement polluée mais de manière réversible ;
- Une teneur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité ;
- Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense

2.10. Charge en matières organiques : demande biochimique en oxygène (DBO) et demande chimique en oxygène (DCO) : Deux méthodes permettant d'évaluer la quantité en matière organique présente dans l'eau sont généralement utilisées : la demande biochimique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Ces deux méthodes se basent sur la différence entre la teneur en oxygène dissous initiale et la teneur en oxygène dissous finale après oxydation de la matière organique présente dans un échantillon d'eau.

La demande biochimique en oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène utilisée par les bactéries pour décomposer partiellement ou pour oxyder totalement les matières biochimiques oxydables présentes dans l'eau et qui constituent leur source de carbone (graisses, hydrates de carbone, tensioactifs, etc.). Ce prélèvement d'oxygène se fait au détriment des autres organismes vivants du milieu aquatique. En ce qui concerne les eaux domestiques, environ 70% des composés organiques sont généralement dégradés après 5 jours et la dégradation est pratiquement complète au bout de 20 jours. L'indicateur utilisé est généralement la DBO₅ qui correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/l) nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader et

minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée. Plus la DBO₅ est élevée, plus la quantité de matières organiques présentes dans l'échantillon est élevée.

La demande chimique en oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation par voie chimique, effectuée à l'aide d'un oxydant puissant, des composés organiques présents dans l'eau. Elle permet de mesurer la teneur en matières organiques totales (excepté quelques composés qui ne sont pas dégradés), y compris celles qui ne sont pas dégradables par les bactéries. Il s'agit donc d'un paramètre important permettant de caractériser la pollution globale d'une eau par des composés organiques.

La différence entre la DCO et la DBO est due aux substances qui ne peuvent pas être décomposées biologiquement. Le rapport entre la DBO et la DCO constitue une mesure indicative de la « dégradabilité » biochimique des composés présents dans l'eau. Le rapport DCO/DBO évolue d'environ 2,5 (eau résiduaire récemment déversée) à 10-20 après décomposition totale. Dans ce dernier cas, on parle d'une eau bien minéralisée. Cependant, lorsque des composés toxiques sont présents, l'activité biologique est ralentie et, de ce fait, la quantité d'oxygène consommée après 5 jours est moindre. Ceci se traduit également par un rapport DCO/DBO élevé. La DBO et la DCO se mesurent en mg d'O₂ par litre.

2.11. Substances eutrophisantes : différentes formes d'azote et de phosphore (nutriments). Des éléments tels que l'azote (N) et le phosphore (P) constituent des éléments nutritifs (nutriments) indispensables aux végétaux. Les composés qui en contiennent comme les phosphates et les nitrates constituent dès lors des matières nutritives de choix pour les végétaux.

Des concentrations de nitrates et de phosphates trop importantes induisent le phénomène d'eutrophisation (étouffement de la vie aquatique). Toutefois, présentes en trop grande quantité suite à des rejets intempestifs, elles favorisent la prolifération d'algues et de micro-organismes photosynthétiques qui réduisent la pénétration de la lumière dans les couches d'eaux profondes.

Les concentrations en nitrites (NO₂⁻), nitrates (NO₃⁻), ammoniac (NH₃) et ammonium (NH₄⁺), phosphates (PO₃⁻), azote (N) et phosphore (P) sont dès lors des paramètres importants pour le suivi de la qualité des eaux de surface. L'azote « Kjeldahl » représente l'azote organique (ex. acides aminés, urée) et l'azote ammoniacal. Quant à l'azote « total », il correspond à la somme de l'azote organique, de l'azote ammoniacal, des nitrites et des nitrates.

Les phosphates interviennent dans la composition de nombreux détergents. Ils doivent être dégradés et hydrolysés par les bactéries en orthophosphates pour être assimilables par les autres organismes aquatiques. Le contenu en phosphore total reprend non seulement les orthophosphates mais également les polyphosphates (détergents, rejets industriels) et les phosphates organiques. L'eutrophisation peut déjà se manifester à des concentrations relativement basses en phosphates (50 µg P/l).

Le lessivage des terres après épandage d'engrais, les eaux usées domestiques et certaines eaux usées à caractère basique constituent des sources directes de nitrates.

2.12. Métaux lourds : Le suivi des concentrations en métaux lourds (densité $> 5 \text{ g/cm}^3$) est particulièrement important vu leur toxicité et leur capacité de bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement.

Les métaux lourds caractérisent certains types de pollution, comme par exemple :

- La présence de cuivre et de nickel 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 désaffectés) ;
- 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 (toitures métalliques, gouttières) ;
- Le cadmium peut notamment être rejeté par des usines de galvanoplastie et des industries chimiques de textiles et de teintures.

Les métaux lourds se dissolvent très bien dans une eau acide (pH faible). Dans des eaux neutres ou basiques, ils précipitent et s'accumulent principalement dans la phase solide (boues). L'analyse de ces boues permet ainsi d'obtenir une vue de l'ensemble des déversements en métaux lourds qui ont eu lieu, tant en nature qu'en quantité.

La toxicité du zinc, influencée par la dureté de l'eau, son contenu en oxygène et la température, concerne surtout les plantes et les algues. La toxicité du cuivre pour le milieu aquatique est fortement dépendante de l'alcalinité, du pH et de la présence de matières organiques. De manière générale, les salmonidés (saumons, truites) sont très sensibles au cuivre et au zinc.

3. Origine naturelle et anthropique des éléments chimiques : La qualité des eaux est le résultat d'une acquisition naturelle de minéralisation à laquelle se surajoutent les apports anthropiques.

3.1. Les contaminants naturels

a. Dissolution et altération : Du fait d'une cinétique lente, les réactions d'altération des silicates produisent généralement, avec des temps de réaction n'excédant pas quelques mois ou années, une minéralisation modérée. La dissolution des carbonates, contrôlée par l'équilibre calco-carbonique (limitation par la solubilité de la calcite et de la dolomite), n'engendre pas non plus de minéralisation excessive.

En revanche, les évaporites (sulfates, chlorures, nitrates, borates...), dont la cinétique de dissolution très rapide alliée à une grande solubilité des minéraux (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot n \text{ H}_2\text{O}$, anhydrite CaSO_4 , halite

NaCl, sylvine KCl, caliche NaNO_3 , nitre ou salpêtre KNO_3 , borax $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O} \dots$), sont susceptibles d'apporter à l'eau tous leurs ions constitutifs comme contaminants naturels : teneurs de plusieurs g/L de SO_4^{2-} , de plusieurs centaines de g/L de Cl^- . Dans les régions semi-arides ou arides, ces ions rendent inutilisables de nombreuses ressources en eau de surface ou souterraines.

L'évaporation des eaux de surface (sebkhas, chotts) et des solutions du sol sous les climats tropicaux secs provoque la concentration des sels en surface et dans le sol.

b. Biseau salé : Une autre cause de contamination naturelle est la présence d'une interface souterraine eau douce-eau salée. Bien qu'en régime statique, les lentilles d'eau douce « flottent » sur l'eau salée de la mer ou des estuaires, l'écoulement souterrain peut amener le mélange de ces deux composantes, en milieu hétérogène.

c. Milieux confinés : Les aquifères captifs, dans lesquels le potentiel Redox est bas du fait de la consommation de l'oxygène dissous, puis de celle des nitrates... par les réactions d'oxydation des sulfures ou de la matière organique, sont le siège de la mise en solution de métaux indésirables (fer et manganèse). Si la réduction est plus poussée, peuvent apparaître ammonium, sulfures et méthane.

d. Matière organique naturelle : Les nappes alluviales, dans lesquelles les cours d'eau ont apporté divers éléments organiques (bois, feuilles...) peuvent avoir des teneurs en carbone organique total (COT) ou en hydrocarbures élevées, du même ordre de grandeur que celles induites par des pollutions anthropiques faibles.

3.2. Les pollutions anthropiques

L'activité humaine engendre des rejets gazeux, liquides et solides dans le milieu (atmosphère, eaux de surface, sol, nappes) qui, directement (rejets) ou indirectement, vont affecter les eaux souterraines. L'infiltration verticale (recharge) ou latérale (limites à flux entrant : berges de cours d'eau), la lixiviation de l'atmosphère et des sols vont contribuer à la dégradation qualitative des ressources.

a. Origine domestique : Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannées et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes...) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionné, les stations d'épuration urbaines surchargées... Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants.

b. Origine industrielle : Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité : substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds... Les pollutions sont exceptionnelles (incident dans un procédé industriel) mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations...) Un cas particulier est celui des

exploitations minières. L'extraction des granulats en plaine alluviale met en contact l'eau de la nappe avec les polluants éventuels.

c. Origine agricole : La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps ; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines, alors que les professionnels agricoles ont longtemps nié l'impact de leur activité sur la qualité de l'eau et refusé la moindre contrainte. Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, soit par rejet dans des puits perdus, des gouffres et bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. Une pollution ponctuelle commune est fournie par les eaux de rinçages des récipients et appareils d'épandage. L'épandage des boues de stations d'épuration pose problème par leur charge possible en métaux lourds et germes, en plus de leur richesse en azote résiduelle après culture. Les élevages intensifs de porcs, bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockées en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais (ou comme aliments...).

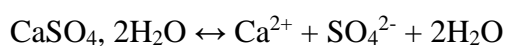
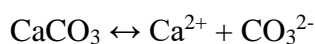
d. Origine urbaine et routière : Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident...) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des Stations d'épuration, en particulier absence de traitement tertiaire) par les fuites de cuves de carburants (essence, fioul), par les cimetières.

L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.

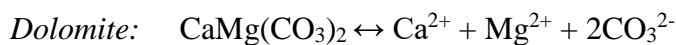
e. Injection de produits toxiques dans le sous-sol : Cette méthode est utilisée aux U.S.A. pour se débarrasser de produits indésirables. Les risques de pollution des nappes profondes sont grands. En France, la méthode d'injection n'est utilisée que pour stocker le gaz.

3.3. Origine de quelques éléments chimiques :

- **Calcium (Ca^{+2}) :** Cet élément est fréquent dans les roches carbonatées, sa présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4) selon les équations suivantes :



- **Magnésium (Mg^{2+})**: Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) selon les relations suivantes:

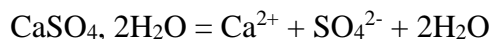


- **Sodium (Na^+)**: L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante : $NaCl \leftrightarrow Na^+ + Cl^-$

- **Potassium (K^+)**: Le potassium (K^+) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaison dans les sols, sur les argiles notamment. Les sources principales de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.

- **Chlorures (Cl^-)**: Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage 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

- **Sulfates (SO_4^{2-})**: Les origines des sulfates dans les eaux sont variées. Elles sont liées à l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer) et à la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypseuses, selon la relation :



- **Bicarbonates (HCO_3^-)**: Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et gypsifères selon l'équation suivante :



4 . Vulnérabilité des eaux souterraines : dans une zone considérée, on peut se trouver dans trois cas différents ; absence totale d'eau souterraine, présence d'une nappe libre et présence d'une nappe captive.

La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine est principalement fonction de la perméabilité du sol et de l'aquifère non saturé et de leur épaisseur totale.

En l'absence de données précises sur le coefficient de perméabilité, on peut définir cinq grandes classes de vulnérabilité d'après la géologie locale :

- Classe 1 : très forte vulnérabilité : calcaire et dolomies karstiques. Pouvoirs filtrants et d'auto-épuration nuls. Impact presque immédiat de la pollution ;

- Classe 2 : forte vulnérabilité. Roche fissurées peu karstifiées (craie, calcaires, dolomies, basalte). Propagation plus lente de la pollution (quelque dizaine à centaines de mètres par jour) ;
- Classe 3 : moyenne vulnérabilité. Roches meubles (sable, grès, projections volcaniques). Propagation lente, quelques centimètres ou mètres par jour. Filtration active des matières en suspension ;
- Classe 4 : faible vulnérabilité. Formation hétérogènes de type placage argilo-sableux, aquifères multicouches. Perméabilité faible ;
- Classe 5 : très faible vulnérabilité. Formation peu perméable ou imperméable (argiles, schistes). La pollution affectera uniquement les eaux de surface.