Document public

Mémento technique des eaux minérales (Volume 2)

Rapport final

BRGM/RP-53189-FR
Janvier 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM PSP04EAU50

P. Vigouroux

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Eau minérale, géothermomètre, traitement, Fer, Manganèse, radioactivité, contexte environnemental.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vigouroux P. - (Janvier 2004) – Mémento technique des eaux minérales (volume 2) – Rapport final – Rap BRGM RP-53189-FR, 110p.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Avertissement

La division nationale des eaux minérales et thermales a édité, en concertation avec l'antenne eau minérale du BRGM, plusieurs notes techniques relatives à différents aspects spécifiques des eaux minérales.

Ces notes sont accessibles au plus grand nombre via l'accès internet mis en place par le ministère : www.industrie.gouv.fr / rubrique énergie et matières premières – sous rubrique eau minérale.

La possibilité de disposer de ces notes sous forme de documents imprimés est ouverte par l'édition du présent rapport qui complète une édition précédente relative aux douze premières notes techniques (Rapport BRGM R40145). Le présent rapport est ainsi édité sous un libellé dit « Volume II », il regroupe les notes techniques n° 13 à 16 ainsi qu'un glossaire référencé comme note technique n° 0.

Dans la continuité de l'édition précédente, il convient de rappeler que les différents sujets sont abordés sous l'angle des eaux minérales, étant entendu que de nombreuses considérations ici développées peuvent être étendues , en tout ou partie, au domaine, plus large, des eaux souterraines.

Sommaire

Rappel volume I (rapport BRGM R 40145)

Note technique n° 1 :	**Etude d'un gisement – Les méthodes mises en œuvre**
Note technique n° 2 :	**Les techniques de forage utilisées en eau minérale**
Note technique n° 3 :	**Le suivi du forage d'eau minérale – Approche méthodologique**
Note technique n° 4 :	**Equipement de forage d'exploitation d'eau minérale – Approche méthodologique**
Note technique n° 5 :	**Le pompage de qualification**
Note technique n° 6 :	**Périmètre sanitaire d'émergence**
Note technique n° 7 :	**Les techniques isotopiques – Application aux eaux minérales**
Note technique n° 8 :	**Représentations graphiques des résultats d'analyses d'eau minérale**
Note technique n° 9 :	**Les méthodes géophysiques utilisées en recherche d'eau minérale**
Note technique n° 10 :	**Les eaux minérales et le gaz carbonique**
Note technique n° 11 :	**Abandon et fermeture des forages**
Note technique n° 12 :	**Mesures et suivi d'exploitation des émergences d'eau minérale**

Volume II (le présent rapport)

Note technique n° 0 :	**Glossaire des Eaux Minérales**
Note technique n° 13 :	**Les géothermomètres chimiques**
Note technique n° 14 :	**Le traitement du Fer et du Manganèse dans les eaux minérales**
Note technique n° 15 :	**Eau minérale et radioactivité**
Note technique n° 16 :	**Contexte environnemental**

Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie

Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

Glossaire des Eaux Minérales

Note technique n°0

Octobre 1998

DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

Glossaire EAUX MINÉRALES

Edition du 01/07/1998 révision N° 0

AVANT PROPOS

Objet : *Le glossaire des eaux minérales, associé au mémento technique des eaux minérales* édité par la Division Nationale des Eaux Minérales, a pour objet non seulement de préciser la définition des termes usuels mais également d'orienter l'utilisateur du glossaire vers les notes techniques ou documents spécifiques susceptibles d'apporter une information développée.

Mode de présentation :

Les termes figurant dans le glossaire ont été regroupés par thèmes spécifiques destinés à faciliter la recherche des informations. Dans chaque thème les termes sont classés par ordre alphabétique. L'annexe 1 permet en outre de retrouver la position d'un terme particulier dans le document grâce au classement par ordre alphabétique de tout le contenu du glossaire.

Nota 1 :

Les termes retenus dans le présent document sont les plus usuels relevés dans les dossiers de demande d'autorisation, dans les rapports d'instruction (de la DRIRE, du LNEHT, de l'Académie Nationale de Médecine), dans les arrêtés ou dans des rapports spécifiques de la DNEMT. A vocation très appliquée, le glossaire ne reprend pas les définitions les plus générales sur les différentes thématiques retenues.

Nota 2 :

Le glossaire constitue à l'évidence un document perfectible dans le temps qui, ayant pour vocation de répondre aux attentes de ses utilisateurs, se doit d'évoluer en fonction des demandes et observations particulières de chacun. Dans cette optique, il a pour ambition de renforcer la synergie entre acteurs du domaine des eaux minérales en France et entend prendre en compte les remarques critiques qui seront formulées pour l'édition de révisions successives.

Nota 3 :

Les termes définis par le glossaire sont édités au long du document en **caractère gras** pour faciliter la compréhension.

SOMMAIRE

Thèmes 1 : Concepts généraux

- Coordonnées Lambert (figure 1)
- Eau minérale
- Eau minérale naturelle
- Eau thermale
- Emergence
- Fréquentation
- Numéro BSS
- P.S.E. (Périmètre Sanitaire d'Emergence)
- Périmètre de protection
- Production
- Protection sanitaire
- Recaptage
- Réhabilitation
- Source

Thème 2 : Hydrogéologie

- Aquifère
- Artésianisme
- Débit critique
- Débit spécifique
- Développement
- Gisement
- Interférence
- Karstique (aquifère)
- Nappe captive
- Nappe libre
- Nappe superficielle
- Niveau dynamique
- Niveau piézométrique
- Niveau statique
- Perméabilité
- Pompage d'essai
- Pompage de qualification
- Rabattement
- Transmissivité
- Zone non saturée
- Zone saturée

Thème 3 : Techniques de prospection

- Diagraphies
- Gaz du sol
- Géochimie
- Géophysique
- Géothermomètre
- Structurale

Thème 4 : Techniques de forage / équipement

- Annulaire (espace)
- Cimentation
- Complétion
- Crépine
- Débit nominal d'une pompe
- Diamètre de foration / équipement
- Marteau Fond de Trou (MFT)
- Point de bulle
- Pompe (type et diamètre)
- Rotary
- Télescopage
- Tubage à l'avancement (TAL)
- Tubage plein

Thème 5 : Physico-chimie

- Bilan ionique
- Conductivité (à 20□C et à t°C)
- Dureté
- Facies physico-chimique
- Gaz carbonique
- Gaz Liquide Ratio (GLR)
- Karat
- Majeurs (éléments)
- Milliéquivalents/l et mg/l
- Représentation graphique
- Résistivité
- Titre Alcalimétrique Complet (TAC)
- Titre hydrotimétrique

Thème 6 : Géochimie isotopique

- Carbone 14
- Deutérium
- Isotopes
- Oxygène 18
- Tritium

Thème 7 : Radioactivité

- Activité radioactive
- Dose absorbée (Gy)
- Equivalent de dose (Sv)
- Limite Annuelle d'Incorporation (LAI)

Thème 8 : Bactériologie

- Bactéries sulfitoréductrices
- Coliformes fécaux ou thermotolérants
- Coliformes totaux
- Germes revivifiables
- Légionnelles
- Pseudomonas Aeroginosa
- Streptocoques fécaux

Thème 9 : Traitement Embouteillage

- Déferrisation
- Démanganisation
- Filtration
- Nettoyage En Place (NEP)
- Ozonation

Annexe 1 : Lexique des termes du glossaire (par ordre alphabétique)

Annexe 2 : Lexique des abréviations usuelles

- G.L.R.
- H.M.T.
- L.A.I.
- M.F.T.
- N.E.P.
- P.E.H.D.
- P.E.T.
- P.V.C.
- T.A.C.
- T.A.L.

Bibliographie

Figure 1 : Coordonnées Lambert - Exemple de détermination sur carte IGN.

Figure 2 : Filtration, seuil de coupure des membranes pour les analyses bactériologiques.

THÈME 1 : CONCEPTS GÉNÉRAUX

COORDONNEES LAMBERT

Les **coordonnées** d'un point définissent sa position dans un repère référencé. Pour les abscisses (X) la référence **Lambert** correspond, au niveau de la France métropolitaine, à un repérage par rapport au méridien de Paris décalé de 600 km à l'Ouest (sauf pour la Corse pour laquelle le décalage est de 234,358 m). Quant aux ordonnées (Y), la référence est décalée de 200 km vers le sud par rapport au « parallèle origine » (sauf pour la Corse pour laquelle le décalage est de 185 861,669 m). On y distingue 4 zones successives du Nord au Sud :

Dénomination	Parallèle Origine	Limite Nord	Limite Sud
Lambert I ▫ zone Nord	55	Extrémité Nord du territoire	53G50 Ligne Colmar - Douarnenez
Lambert II ▫ zone Centrale	52	53G50	50G50 Ligne Soulac sur Mer - Tignes
Lambert III = zone Sud	49	50G50	Extrémité Sud du territoire (continent)
Lambert IV = zone Corse	46,85	Département de la Corse	Département de la Corse

Les **coordonnées Lambert** s'exprirnent selon (exemple figure 1) :
Longitude X = 773,80 soit 773 km et 800 m du point de repère (origine Ouest de la France)
Latitude Y = 3220,95 soit Lambert 3 et 220 km, 950 m du point de repère (limite Sud de zone Lambert)

Pour les départements d'Outre Mer les **coordonnées Lambert** s'expriment dans des systèmes référencés au Méridien International, sous désignation d'une zone Lambert spécifique.

Nota : *Il est parfois fait référence à une zone Lambert dite « II étendue » qui concerne le référencement de l'ensemble des points du territoire métropolitain (Corse incluse) sur une zone unique ayant pour repère 0 en X le méridien de Paris décalé de 600 km à l'Ouest et pour repère 0 en Y le parallèle équivalent à 52 G (milieu de la zone Lambert II zone centrale) décalé de 2200 km au Sud. Ainsi l'intersection du Méridien de Paris et du parallèle 52 G (au Sud de Châteauneuf sur Cher, au centre de la France) a pour coordonnées Lambert zone 2 étendue :*

X ▫ 600,000 (600 km)
Y = 2200,000 (2200 km)

EAU MINERALE

Appellation contractée d'une **eau minérale naturelle**. Une **eau minérale** correspond à une eau ayant fait l'objet d'une reconnaissance légale concrétisée, après une procédure administrative, par un arrêté ministériel d'autorisation (Voir « ***eau minérale naturelle*** »).

EAU MINERALE NATURELLE

Pour être reconnue comme telle, une « **eau minérale naturelle** » doit satisfaire à de nombreux critères définis dans des textes réglementaires.
Les critères principaux peuvent être ainsi résumés :

- être d'origine souterraine (provenir d'une **source** exploitée par une ou plusieurs **émergences**) ;
- avoir une pureté originelle, autrement dit, être bactériologiquement saine à l'**émergence**, cette qualité étant garantie par la protection naturelle du **gisement** ;
- être caractérisée par sa teneur en sels minéraux ou oligo-éléments ;
- témoigner d'une stabilité de ses caractéristiques physico-chimiques ;
- se distinguer, le cas échéant, par ses propriétés favorables à la santé, confirmées par des examens ou observations cliniques, et appréciées par l'Académie Nationale de Médecine.

EAU THERMALE

La dénomination d'**eau thermale** constitue un abus de langage sur le plan réglementaire. Dans certains cas, le terme d'**eau thermale** désigne des eaux dont la température permet une utilisation de sa capacité calorifique. Dans d'autres cas, on désignera une **eau thermale** comme étant celle qui alimente un établissement thermal. Dans le cas des eaux minérales, il s'agira généralement d'une « **eau minérale naturelle** ». En dehors de ce domaine il s'agira d'une *ressource géothermique*.

EMERGENCE

Une ***émergence d'eau minérale naturelle*** est l'endroit où elle est collectée par un ouvrage de captage qui peut être une cavité naturelle aménagée, un puits, une galerie ou un forage (voir « **eau minérale naturelle** »).

FREQUENTATION

Le terme « **fréquentation** » définit l'activité d'un établissement thermal en nombre de curistes par an.

NUMERO BSS

Le **numéro de la Banque du Sous-Sol** (BSS) est celui attribué par le BRGM qui gère la banque du sous-sol. Il permet de localiser l'ouvrage sur le fond topographique au 1/50 000 ;

Exemple : 258/4X/0018 :	258	= carte de MELUN
	4X	= secteur Nord Est de la carte
	0018	= 18ème ouvrage enregistré sur le 4 X

- les 4 premiers chiffres renvoient au numéro de la carte topographique correspondante

- les deux caractères du milieu renvoient au 1/8e de carte concerné sachant que la carte est découpée en 8 parties selon :

1X	2X	3X	4X
5X	6X	7X	8X

- les 4 derniers chiffres situent le n° d'ordre de l'ouvrage concerné dans le 1/8e spécifié.

PERIMETRE SANITAIRE D'EMERGENCE (P.S.E.)

Le **P.S.E.** définit la zone de protection sanitaire aux abords immédiats de l'ouvrage de captage.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 6.

PERIMETRE DE PROTECTION

Le **périmètre de protection** d'une **source** d'**eau minérale**, attribué par décret en Conseil d'état à une **source** qui bénéficie d'une déclaration d'intérêt public, a pour objectif d'assurer une protection qualitative et quantitative de l'ensemble du **gisement** alimentant la **source**. Pour y parvenir, des restrictions peuvent être énoncées dans le décret instituant le **périmètre de protection**. Plus précisément, peuvent y être réglementés ou soumis à autorisation spéciale :

- les sondages, travaux souterrains et fouilles profondes,
- les activités diverses comportant des risques de pollution des eaux souterraines.

(Voir « Guide des études préalables à la définition de périmètres de protection des **gisements** et captages d'**eau minérale** » - rapport BRGM R38626 - Octobre 1995).

PRODUCTION

La **production** d'une unité d'embouteillage définit le nombre de cols/an ou de litres/an d'une usine. La relation entre les 2 grandeurs est souvent délicate à établir vu la **production** en contenants de 1,5 litre, 1 litre, 0,5 litre ou même moins, chacun de ces contenants représentant 1 col. La notion de col est très utilisée car elle correspond à la base de calcul pour certaines taxes.

PROTECTION SANITAIRE

La **protection sanitaire** définit l'ensemble des mesures prises pour assurer, à tous les niveaux, la prévention des contaminations bactériologiques ou physico-chimiques d'une **eau minérale**.

(Voir « **périmètre de protection** » et « **périmètre sanitaire d'émergence** »).

RECAPTAGE

Action visant à la réalisation d'un ouvrage de captage remplaçant un autre captage et possédant les mêmes caractéristiques physico-chimiques du fluide exhauré que l'ancien captage.

REHABILITATION

Intervention sur un ancien ouvrage de captage ayant pour objet sa remise en état.

SOURCE

Une **source** d'**eau minérale** naturelle est constituée d'une ou plusieurs **émergences** naturelles ou forées, d'eau et éventuellement de gaz, provenant d'une même nappe ou d'un même **gisement** souterrain.

Une **source** d'**eau minérale** est identifiée par un nom qui lui est attribué par l'arrêté ministériel d'autorisation ; cet arrêté vaut reconnaissance.

(Voir « **émergence** »).

THÈME 2 : HYDROGÉOLOGIE

AQUIFERE

« Milieu souterrain qui contient de l'eau en partie mobilisable par gravité » (J. Margat, Dictionnaire Français d'Hydrogéologie). Ce milieu, constitué de roches perméables, est suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un **aquifère** comporte une **zone saturée** (*ensemble du milieu solide et* de l'eau contenue) et peut comporter une **zone non saturée** (zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface de la **zone saturée** pour une **nappe libre**).

ARTESIANISME

Caractéristique d'un **aquifère** captif : **niveaux piézométriques** initiaux situés au-dessus du toit de l'**aquifère**.

Dans le langage courant on distinguera un ouvrage artésien jaillissant, permettant une exhaure naturelle sans moyen de pompage, d'un ouvrage artésien pour lequel le niveau statique s'établit au-dessus du toit de l'**aquifère** sans dépasser le niveau du sol (nécessité de mise en pompage pour assurer l'exhaure).

DEBIT CRITIQUE (UNITE : m^3/h)

D'un point de vue strict le **débit critique** correspond au débit maximal pouvant affluer d'un **aquifère** à un ouvrage de captage en écoulement laminaire, c'est-à-dire sans dépassement de la vitesse critique. Dans le domaine des eaux minérales, le **débit critique** correspond au débit maximal exploitable permettant d'obtenir la stabilité hydrodynamique requise. Des essais spécifiques permettent d'approcher cette notion et de guider les essais de qualification à entreprendre pour caractériser un captage dans un **gisement d'eau minérale**.

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 5.

DEBIT SPECIFIQUE (UNITE : $m^3/h/m$)

Le **débit spécifique** définit le débit pompé dans un ouvrage rapporté à la hauteur de **rabattement** dans l'ouvrage dans des conditions définies. Le calcul du **débit spécifique** est fait par réalisation d'un essai de débit relatif à un pompage de courte durée opéré dans un ouvrage (en général en fin d'exécution), avec mesure du **rabattement** final. Il convient d'être très prudent sur l'interprétation d'une mesure de **débit spécifique**. En effet, s'agissant d'une valeur obtenue sur un essai ponctuel très limité dans le temps, l'extrapolation à un comportement sur la longue durée est très délicate (Symbole usuel : Qs).

DEVELOPPEMENT

Action de développer un forage : augmenter artificiellement la **perméabilité** du milieu **aquifère** à proximité de la paroi de l'ouvrage par divers procédés appropriés (pistonnage, pompage saccadé, acidification, fracturation) en vue de réduire les pertes de charge et d'améliorer l'efficacité de l'ouvrage, en général avant sa mise en exploitation. Pratiquement le **développement**, réalisé pour des valeurs de débit inférieures au débit d'exploitation, permet par la mise en place des massifs de graviers et du terrain autour de l'ouvrage, avec évacuation des fines, d'assurer des conditions d'exploitation optimales.

Dans le cas de l'acidification et de la fracturation, on parle également de stimulation de l'**aquifère**.

GISEMENT

Un « **gisement d'eau minérale naturelle** » est constitué par l'ensemble de la structure géologique souterraine, située au droit d'une zone géographique délimitée, et de laquelle il est possible d'extraire, moyennant la mise en œuvre de techniques appropriées, une **eau minérale naturelle**.

Les hydrogéologues étendent généralement la notion de **gisement** aux zones d'alimentation et de transfert.

Cette définition étendue impose un niveau de connaissance tel, qu'il permette d'appréhender de façon cohérente la structure géologique et l'aire géographique concernées par l'ensemble du trajet souterrain de l'**eau minérale** depuis l'aire d'alimentation jusqu'à l'aire de captage.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 1.

INTERFERENCE

Recouvrement des aires d'influence de deux ou plusieurs ouvrages en production, imposant à chaque ouvrage une influence (**rabattement**, relèvement) non négligeable, déterminée par l'action des autres.

La notion d'**interférence** est importante à considérer dans le cadre des essais de production réalisés dans un **gisement** exploité par plusieurs **sources** ou **émergences**. L'évaluation du comportement d'un ouvrage en production doit tenir compte des influences qu'il exerce sur les ouvrages voisins au regard des risques qualitatif et quantitatif encourus pour l'**eau minérale**.

KARSTIQUE (AQUIFERE)

Aquifère dont les conditions et le comportement correspondent au karst : hétérogénéité, discontinuités (compartimentage du réservoir), prédominance de l'écoulement des eaux souterraines par chenaux et conduits de grande dimension (conduits **karstiques**) à fonction collectrice ou distributrice, existence possible de cavités de grande capacité.

L'**aquifère karstique** se caractérise généralement par la rapidité des écoulements et une **filtration** faible.

NAPPE CAPTIVE

Nappe ou partie d'une nappe soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont le **niveau piézométrique** est supérieur au toit de l'**aquifère**, à couverture *moins perméable, qui la contient.*

NAPPE LIBRE

Nappe dont le niveau supérieur est à la pression atmosphérique (surface libre). Le niveau de cette nappe peut fluctuer et on distingue ainsi une **zone saturée** et une **zone non saturée**.

NAPPE SUPERFICIELLE

La notion de **nappe superficielle** *ou nappe phréatique, imprécise au plan hydrogéologique,* caractérise généralement une nappe peu profonde atteinte par les puits ordinaires. En pratique il s'agit d'une nappe généralement libre à surface proche du sol dont l'alimentation et la qualité sont influencées par les activités de surface (cours d'eau, réseaux).

NIVEAUX DYNAMIQUE (UNITE : m)

Niveau piézométrique influencé - rabattu ou relevé - par opposition au niveau naturel au même point ; plus particulièrement, plan d'eau rabattu ou relevé, stabilisé ou non, dans un puits de pompage ou un ouvrage d'injection.

NIVEAU PIEZOMETRIQUE (UNITE : m)

Niveau de l'eau mesuré par un ouvrage atteignant un **aquifère**.

NIVEAU STATIQUE (UNITE : m)

Niveau piézométrique non influencé dans un puits, un piézomètre, auquel se réfère le **rabattement** ou le relèvement. S'oppose à un **niveau dynamique** influencé.

PERMEABILITE (UNITE : m/s)

Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel.

On distingue la **perméabilité** horizontale et la **perméabilité** verticale selon 2 directions d'écoulement perpendiculaires. En pratique lorsque le terme **perméabilité** est employé (dans un essai de production d'ouvrage par exemple) il s'agit d'une caractérisation du milieu poreux dans le sens de l'écoulement de la nappe (horizontal). (Symbole usuel : k)

POMPAGE D'ESSAI

Pompage opéré dans un ouvrage, avec contrôle de l'évolution du débit pompé et des **rabattements** déterminés dans l'**aquifère**, pendant et après le pompage, pour évaluer les paramètres de l'**aquifère**, d'après l'analyse de ces données.

POMPAGE DE QUALIFICATION

Ce pompage désigne la procédure qui permet l'obtention des données utiles pour la qualification d'une **émergence** d'eau.
En ce qui concerne **l'eau minérale**, il a pour objet de définir les conditions d'exploitation d'une **source** qui respectent l'ensemble des dispositions réglementaires à savoir la stabilité de la qualité physico-chimique, l'absence de contamination bactériologique et enfin la stabilité des paramètres hydrauliques prouvant la non surexploitation du **gisement**.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 5.

RABATTEMENT (UNITE : m)

Diminution de charge hydraulique déterminée en un point donné sous l'effet d'un prélèvement d'eau, traduite en pratique par l'abaissement du **niveau piézométrique** par rapport au niveau naturel. Sa signification est liée au débit prélevé, à la distance du point de prélèvement et en régime transitoire, au temps écoulé depuis le début du prélèvement.

Le **rabattement** observé dans un puits en pompage est la somme de la perte de charge dans l'**aquifère** et des pertes de charges dues au puits.

TRANSMISSIVITE (UNITE : m2/s)

Paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, *L*, d'un **aquifère**, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, *i*. Il évalue la fonction conduite de l'**aquifère**.

La **transmissivité** est égale au produit du coefficient de **perméabilité**, *K*, par l'épaisseur de l'**aquifère**, *b*. Elle s'exprime en m2/s.

Transmissivité, $T_{(m2/s)} = K_{(m/s)} . b_{(m)}$

La **transmissivité**, paramètre très utilisé pour caractériser des niveaux **aquifères**, permet de comparer de façon relative la capacité de production de ces niveaux :
$T > 10^{-2}$ m2/s fort potentiel de production (Q > 100 m3/h)
10^{-2} m2/s > T > 10^{-4} m2/s potentiel de production moyen (Q < 100 m3/h)
$T < 10^{-4}$ m2/s potentiel de production faible (Q < 10 m3/h)

*Nota : Ces ordres de grandeurs sont donnés à titre indicatif et doivent être relativisés selon les types d'**aquifères** concernés (continu, fracturé), leur mode de captage (équipement) et les modalités d'exploitation.*

ZONE NON SATUREE

Zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une **nappe libre**.

ZONE SATUREE

Zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant, dans un **aquifère**, une nappe d'eau souterraine.

Dans un **aquifère à nappe libre** la limite supérieure de la **zone saturée** est la surface de la nappe.

THÈME 3 : TECHNIQUES DE PROSPECTION

DIAGRAPHIES

Mesures de la distribution d'un paramètre sur la verticale, à l'intérieur d'un forage. Le domaine d'application des diagraphies est très large :

- hydraulique (vitesse, ...)
- physico-chimique (température, **conductivité**, oxygénations, ...)
- électrique (polarisation spontanée, image électrique, ...)
- radioactivité (gamma-ray, neutron, ...)
- acoustique (vitesse d'onde, imagerie acoustique, ...)
- technique (diamètre, inclinaison, cimentation, vidéo, ...)

Les mesures sont réalisées à l'aide de sondes descendues dans le forage.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 9.

GAZ DU SOL

Mesures de gaz CO2 et radon à faible profondeur (0,5 m environ) sur une surface donnée. La représentation spatiale (carte) des valeurs obtenues permet d'identifier les zones d'anomalie et donc de circulation préférentielle du gaz sur le secteur prospecté. Ces zones d'anomalies peuvent aider à l'identification des zones de transits des circulations d'eau. Cette méthode nécessite d'être corrélée avec d'autres approches (géologie **structurale**, chimie, **géophysique** ...)

GEOCHIMIE

Etude de la chimie des roches et des eaux (et de leurs interactions) nécessaire à la compréhension de l'origine et des caractéristiques de l'eau souterraine.

GEOPHYSIQUE

Techniques d'acquisition de données indirectes sur la géologie. Les méthodes **géophysiques** sont nombreuses et variées selon le paramètre physique pris en compte (électrique, magnétique, acoustique, gravimétrique, électromagnétique).
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 9.

GEOTHERMOMETRE

Utilisation des concentrations chimiques ou de rapports de concentrations (SiO2 ; Na/K...) des eaux pour la détermination de la température à laquelle l'eau a été portée dans le sous-sol et à laquelle elle a acquis sa minéralisation par intéraction avec les minéraux des roches traversées.

STRUCTURALE

Technique d'étude de la structure géologique d'un secteur donné.
Rattachées au domaine de la tectonique, ces études s'intéressent aux conséquences sur les formations géologiques des contraintes imposées par les mouvements à l'échelle géologique. Selon l'échelle d'observation (régionale ou locale) l'analyse **structurale** concernera l'étude de l'incidence de grands mouvements (compression-distension) ayant induit des déformations majeures (horst, graben, chevauchements, ...) ou l'étude de l'incidence des mouvements à l'échelle du site ou de l'échantillon (microfractures, ...).

THÈME 4 : TECHNIQUES DE FORAGE - EQUIPEMENT

ANNULAIRE (ESPACE)

Au niveau d'un forage équipé, l'**annulaire** concerne la zone située entre le tubage et le terrain naturel. Cette notion peut s'étendre à l'espace situé entre 2 tubages concentriques.

CIMENTATION

Opération consistant à remplir de coulis de ciment un espace déterminé. Dans la pratique on notera l'expression « tubage cimenté de 0 à 40 m » qui signifie que l'espace **annulaire** a été rempli de coulis de ciment afin d'assurer une étanchéité de la partie profonde d'un ouvrage vis à vis des terrains de surface (de 0 à 40 m pour l'exemple donné).
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 4.

COMPLETION

Opération de mise en place dans un forage des équipements destinés à assurer sa pérennité et la mise en production des niveaux **aquifères** souhaités. Ces équipements sont d'une part le bouchon de fond et le tube décanteur de fond d'ouvrage, d'autre part les **crépines** et tubes plein. On notera que dans certains cas particuliers des ouvrages laissés en « trou nu », et exploités tel quel, ne font l'objet d'aucune **complétion**.

CREPINE

Tube ajouré mis en place dans un forage lors des opérations de **complétion**. La **crépine** (ou tubage crépiné) permet le passage de l'eau tout en maintenant la formation productrice.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 4.

DEBIT NOMINAL D'UNE POMPE

Débit d'une **pompe** correspondant à son fonctionnement optimal. Chaque **pompe** est caractérisée par une courbe de fonctionnement établie en fonction du débit et de la Hauteur Manométrique Totale (HMT = hauteur de refoulement intégrant les pertes de charges). Le fonctionnement d'une **pompe** en dehors de la plage préconisée par le constructeur peut provoquer des désordres.

DIAMETRE DE FORATION / EQUIPEMENT

Diamètre du trou réalisé par la machine de forage et du tubage mis en place. Le choix du diamètre dépend de l'objectif fixé pour l'ouvrage à réaliser et des risques géologiques encourus lors de la foration. En effet, le diamètre de foration initial doit permettre la mise en place d'un tubage de maintien des niveaux forés en cas d'avarie (éboulement, ...) Afin de poursuivre la foration en diamètre plus réduit (voir Télescopage).

A titre indicatif les diamètres usuels employés pour des ouvrages n'excédant pas quelques centaines de mètres sont :

Diamètre de foration	Diamètre de tubage
17"3/8 = 441 mm	13"3/8 = 340 mm
12"1/8 = 308 mm	9"5/8 = 244 mm
8"1/2 = 216 mm	6"5/8 = 168 mm
6" = 152 mm	4"1/2 = 144 mm
3"7/8 = 96 mm	

MARTEAU FOND DE TROU (M.F.T.)

Méthode de foration à l'air qui utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 2.

POINT DE BULLE

Pression à partir de laquelle, pour une eau carbogazeuse, on observe l'individualisation des premières bulles de gaz (passage à un état diphasique). Pour une pression supérieure, le fluide est monophasique le gaz étant entièrement dissous.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 10.

POMPE (TYPE ET DIAMETRE)

Il existe de nombreux types de **pompes**. Les **pompes** les plus couramment utilisées en **eau minérale** sont de type électrique immergée.
A titre indicatif les diamètres usuels employés sont les suivants :

diamètre	débit maxi
2" =	1 m3/h
4" =	8 m3/h
6" =	35 m3/h
8" =	90 m3/h

Nota 1 : Dans certains cas particuliers (température élevée) le fonctionnement des circuits électroniques, mal refroidis par la circulation de l'eau, peut poser des problèmes. On parle alors parfois de ***pompe*** *à bain d'huile cependant dans le domaine des eaux minérales cela présente un risque très important.*

Nota 2 : Dans le cas des systèmes carbogazeux l'exploitation d'un fluide diphasique (eau + gaz) peut poser quelques problèmes d'exploitation (dégazage, entartrage, cavitation). Pour le cas ou le fluide est exploité par forage il est souvent préférable de placer une ***pompe*** *immergée sous le niveau de point de bulle (voir Note Technique DNEMT n° 10). Pour certains débits réduits ou pour des eaux très gazeuses, l'utilisation de* ***pompe*** *à piston peut être nécessaire.*

ROTARY

Méthode de foration qui utilise un outil (trépan), animé d'un mouvement de rotation par les tiges de forage et de translation verticale sous l'effet du poids du train de tige. Les tiges creuses permettent l'injection d'un fluide (air/eau/boue) qui a pour objet entre autres d'évacuer les cuttings.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 2.

TELESCOPAGE

Réduction de diamètre lors de la foration d'un ouvrage. Cette opération est usuellement nécessitée par la mise en place d'un tubage pour des raisons techniques (objectif atteint, problème de stabilité, autres ...).

TUBAGE A L'AVANCEMENT (T.A.L.)

Méthode de foration qui permet la mise en place d'un tubage des parois du trou au fur et à mesure de sa foration.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 2.

TUBAGE PLEIN

Tubage sans perforation (à l'opposé d'un tubage crépiné) mis en place dans un forage. Ce type de tubage peut permettre d'obturer un niveau **aquifère** particulier non souhaité (avec cimentation de l'espace **annulaire**). Il peut être utilisé également pour maintenir la stabilité des terrains traversés.

THÈME 5 : PHYSICO-CHIMIE

BILAN IONIQUE

Bilan entre les anions et les cations pour une analyse d'eau donnée exprimé en milliéquivalent/litre. En théorie, la somme des anions doit être égale à la somme des cations (en meq/l) selon le principe de neutralité électrique. Un écart trop important traduit une erreur analytique ou une analyse incomplète.

CONDUCTIVITE (UNITE = µS/cm)

La **conductivité** électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm.

L'unité de **conductivité** est le microsiemens par centimètre (µS/cm).

Dans la pratique, la **conductivité** traduit la minéralisation totale de l'eau. La valeur de la **conductivité** qui varie en fonction de la température est généralement donnée à 20°C. Pour une eau ayant une **conductivité** Ct à une température de t°C, la **conductivité** à 20°C s'établit selon :

$$C_{20_C} = Ct_\frac{c}{1+0{,}02\,(t-20)}$$

DURETE (UNITE : °F)

La **dureté** ou titre hydrotimétrique (TH) représente la concentration en ions alcalino-terreux (Ca Mg) présents dans l'eau. Dans la plupart des cas, la **dureté** est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium, manganèse et strontium.

La **dureté** s'exprime en milliéquivalents de concentration en $CaCO_3$ ou en degrés français. Le degré français représente la **dureté** d'une solution contenant 10 mg de carbonate de calcium par litre soit 4 mg de calcium c'est à dire 1/5 de milliéquivalent/l. Inversement 1 mEq de Ca = 5°F.

FACIES PHYSICO-CHIMIQUE

Il décrit les caractéristiques physico-chimiques majeures d'une eau selon l'anion et le cation dominants. La représentation graphique de la composition physico-chimique d'une eau permet une lecture directe du **faciès**.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 8.

D'un point de vue réglementaire, les mentions utilisables ont été définies dans la directive Européenne du 15 juillet 1980, annexe III.
VOIR GUIDE DES EAUX MINERALES DE LA DNEMT.

GAZ CARBONIQUE

La teneur en CO2 d'une **eau minérale** gazeuse à l'**émergence** est fonction de la quantité de gaz libre et de gaz dissous (voir **Gaz Liquide Ratio** et **Karat**). Au niveau des analyses (bordereaux des laboratoires) la teneur en CO2 s'exprime en mg/l ou en ml/l. On notera qu'un facteur 2 existe entre ces 2 unités : 1 ml/l de CO2 = 2 mg/l de CO2. (1 mole de gaz = 22,4 litres = 44 g).
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 10.

GAZ LIQUIDE RATIO (GLR)

Proportion en volume de gaz libre (CO_2, N_2 ...) par rapport au volume d'eau gazeuse à la pression à laquelle s'effectue le dégazage. Par exemple un GLR de 2 signifie que l'on a 2 volumes de gaz pour 1 volume d'eau soit 2 litre de gaz CO2 pour 1 litre d'eau soit une concentration d'environ 4 g/l de CO2 libre.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 10.

KARAT

Mesure de la quantité de gaz CO2 dissous dans une **eau minérale** gazeuse, à pression atmosphérique. L'appareil **Karat** permet la détermination du volume de gaz libéré par agitation d'un volume d'eau. Sachant que ce volume est fonction de la température de l'eau, une abaque permet de déterminer la concentration en gaz CO2 dissous. Les mesures de **Karat** n'ont qu'une valeur indicative « de terrain » permettant de comparer le caractère plus ou moins gazeux de plusieurs **émergences** voisines.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 10.

Nota : *La valeur de GLR additionnée à celle du **karat** à l'**émergence** d'une **eau minérale** gazeuse permet d'obtenir sur le terrain une valeur approchée de la concentration en CO2 de l'eau concernée. Une confirmation analytique en laboratoire permet de préciser la valeur exacte de CO2 dissous d'une **eau minérale**.*

MAJEURS (ELEMENTS)

Sont généralement définis comme éléments majeurs les anions et cations qui caractérisent le **faciès physi-cochimique** d'une ***eau minérale***, *c'est-à-dire les éléments suivants* : Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium, Bicarbonates (et Carbonates), Chlorures, Sulfates.

MILLIEQUIVALENTS/l ET mg/l

Les résultats des analyses sont exprimés en meq/l ou mg/l. On passe d'une unité à l'autre en appliquant pour chaque ion un facteur de conversion qui est égal au rapport de la masse molaire à la valence.

Par exemple, pour le calcium, élément bivalent dont la masse molaire est 40 g, une concentration de 1 meq/l correspond à 40/2 = 20 mg/l.

REPRESENTATION GRAPHIQUE

Elle permet la transcription sous forme graphique des résultats d'une analyse physico-chimique à l'aide des éléments majeurs. Variées, les **représentations graphiques** sont utilisées soit pour la caractérisation du **faciès** d'une eau, soit pour le suivi de l'évolution des caractéristiques d'une eau dans le temps, soit pour la comparaison de plusieurs eaux entre elles.
VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 8.

RESISTIVITE (Unité Ω.cm)

La **résistivité** est l'inverse de la **conductivité**, elle est mesurée en ohms.cm (Ω.cm). La relation entre les deux mesures est la suivante :

$$Résistivité\ en\ ohm.cm = \frac{10^6}{conductivité\ en\ \mu Scm^{-1}}$$

TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET (TAC)

Le **TAC** correspond à la teneur de l'eau en carbonates et hydrogénocarbonates (CO_3^{--} et HCO_3^-), il est équivalent à l'alcalinité. Le **TAC** s'exprime en degrés français selon :
1°F correspond à 10 mg de carbonate de calcium ou à 0,2 meq/l.

TITRE HYDROTIMETRIQUE

Voir **dureté**.

THÈME 6 : GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE

CARBONE 14

Isotope radioactif du carbone (^{14}C de période T = 5730 ans) permettant la datation de l'eau jusqu'à 45 000 ans. La mesure est utilisée pour l'estimation des vitesses de circulation dans un **aquifère**.

***Nota** : L'interprétation des résultats de l'analyse ^{14}C est délicate selon que l'on considère l'age absolu ou l'age corrigé en fonction de la composition physico-chimique de l'eau. Les conclusions pour un site donné sont à prendre avec précaution.*

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 7.

DEUTERIUM

Isotope stable de l'Hydrogène (^{2}H) permettant d'apporter des informations sur la nature et l'origine de l'eau température du réservoir, altitude de l'aire d'alimentation, mise en évidence de mélanges, circui hydrodynamique. L'interprétation des données nécessite en général une corrélation avec l'**oxygène 18** (droite de CRAIG).

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 7.

ISOTOPES

L'étude des **eaux minérales** utilise des méthodes de traçages par les **isotopes** du milieu naturel, donc pou des **isotopes** dont les variations de teneurs dans les eaux naturelles sont (en principe) indépendantes de l'intervention humaine. On distingue les **isotopes** de la molécule d'eau dont les plus utiles sont l'**oxygène 18**, **le Deutérium** et **le Tritium**, et les **isotopes** des espèces dissoutes dont les principaux sont les **isotopes** du carbone, du soufre, de l'azote et du chlore.

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N°7.

OXYGENE 18

Isotope stable de l'oxygène (^{18}O) permettant d'apporter des informations sur la nature et l'origine de l'eau : *température du réservoir*, altitude de l'aire d'alimentation, mise en évidence de mélanges, circui hydrodynamique. L'interprétation des données nécessite en général une corrélation avec **le Deutérium** *(droite de CRAIG).*

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 7.

TRITIUM

Isotope radioactif de l'Hydrogène (^{3}H *de période* T = 12,43 *ans*), instable et émetteur β, permettan d'apporter des indications sur le temps de transit des eaux souterraines et indirectement sur le degré de vulnérabilité d'une nappe. *Les concentrations sont exprimées en unité* **Tritium** (UT) qui exprime le rappor $^{3}H/^{1}H$.

***Nota** : 1 litre d'eau de concentration 1 UT représente une radioactivité de 0,118 Becquerel.*

VOIR NOTE TECHNIQUE DNEMT N° 7.

THÈME 7 : RADIOACTIVITÉ

ACTIVITE RADIOACTIVE (Bq)

Dans le S.I. (Système International), l'activité radioactive s'exprime en becquerel. Elle concerne l'ensemble des activités alpha et bêta.

Le becquerel est l'activité d'une quantité de nucléides radioactifs pour laquelle le nombre moyen de transitions (désintégration) nucléaires spontanées par seconde est égal à 1.

L'activité dans l'unité hors système est le Curie.

1 Bq = 2,07027 . 10^{-11}Ci
1Ci = 3,7 . 10^{10} Bq
L'activité en becquerel par unité de volume (Bq/l) définit l'activité volumique

DOSE ABSORBEE (GY)

C'est le quotient de l'énergie moyenne communiquée par les rayonnements ionisants à la matière dans un élément de volume, par la masse de matière contenue dans cet élément de volume.

L'unité de dose est le Gray (Gy) : **dose absorbée** dans une masse de matière de un kilogramme à laquelle les rayonnements ionisants communiquent en moyenne de façon uniforme une énergie de 1 joule.
1 Gy = 1 J/kg

Les **doses absorbées** peuvent s'exprimer en rad qui est un sous multiple du Gray.
1 rd = 10^{-2} Gy
1 Gy = 100 rad

EQUIVALENT DE DOSE (SV)

Pour les besoins de la radioprotection, on définit une grandeur appelée ***équivalent de dose***. L'**équivalent de dose** est défini comme le produit de la **dose absorbée** par le facteur de qualité et d'autres facteurs adéquats éventuels.

Dans le système S.I., l'unité d'**équivalent de dose** est le sievert.
1 Sv = 1 J/kg = 100 rems

Le niveau de référence recommandé par l'OMS pour la dose effective engagée attribuable à la consommation d'eau de boisson pendant un an est de O,1 millisievert (mSv).

LIMITE ANNUELLE D'INCORPORATION (L.A.I.)

Des **limites annuelles d'incorporation** ont été recommandées par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). Ces limites définissent les concentrations de référence correspondant à une dose de 0,1 mSv pour une année de consommation.
Les activités volumiques des principaux radioéléments naturels présents dans l'eau de boisson correspondant à la dose de référence de 0,1 mSv pour une année de consommation sont :

- **Radium 226 : 1 Bq/l**
- **Uranium 234, U235 et U238 : 4 Bq/l**

THÈME 8 : BACTERIOLOGIE

BACTERIES SULFITOREDUCTRICES

Ce sont des formes de résistance d'organismes anaérobies, dont les plus fréquentes et les plus faciles à mettre en évidence sont les Clostridies. Elles sont normalement présentes dans les matières fécales mais en plus petite quantité que E. Coli. Elles sont également présentes dans le sol, les rivières. Leur absence dans une nappe souterraine ou une nappe alluviale est un signe d'efficacité de la **filtration** naturelle.

Leur présence en l'absence de germes fécaux dans les eaux peut être interprétée comme un défaut de protection de la nappe contre la présence d'une flore bactérienne étrangère.

Du fait de leur similitude de comportement avec les parasites, les spores constituent un bon indicateur pour ces microorganismes. En outre, ces formes résistent à la chloration. Ceci explique que pour ce paramètre particulier, ce ne sont pas les bactéries elles-mêmes mais leurs spores qui sont recherchées.

Le dénombrement pour les eaux minérales doit porter sur un volume de 250 ml, à l'**émergence** une **eau minérale** doit en être exempte.

COLIFORMES FECAUX OU THERMOTOLERANTS

Ce coliformes sont capables de se développer à 44°C alors qu'aucune croissance n'est observée à cette température pour les souches non fécales.

La principale bactérie coliforme spécifiquement d'origine fécale est Escherichia coli (E. Coli). Cette bactérie apparaît toujours en grandes quantités dans les déjections animales et humaines et ne se trouve qu'exceptionnellement dans les sols et les eaux qui n'ont pas été l'objet d'une pollution fécale.

Les **coliformes fécaux** ou **thermotolérants** constituent un bon test de contamination des eaux par les matières fécales.

Leur dénombrement pour les eaux minérales doit se faire sur un volume de 250 ml, à l'**émergence** une **eau minérale** doit en être exempte.

COLIFORMES TOTAUX

Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais peuvent également se développer dans certains milieux naturels (sol, végétation).

L'absence de **coliformes totaux** ne signifie pas nécessairement que l'eau ne présente pas de risque pathogène car il peut exister des kystes de certains parasites.

Le dénombrement par ensemencement en milieu liquide ou par **filtration** sur membrane concerne un volume de 250 ml. A l'**émergence** une **eau minérale** doit être exemple de coliformes.

GERMES REVIVIFIABLES

La recherche des microorganismes aérobies non pathogènes dits « revivifiables » permet de dénombrer les bactéries se développant dans des conditions habituelles de culture et représentant la teneur moyenne en bactéries d'une ressource naturelle. Ces germes n'ont pas d'effets directs sur la santé mais sous certaines conditions, ils peuvent générer des problèmes. Ce sont des indicateurs qui révèlent la présence possible d'une contamination bactériologique.

La méthode de référence pour l'analyse consiste en un dénombrement du nombre de germes par ml d'eau selon :

- germes totaux à 22°C = comptage des colonies obtenues après incubation à 22°C durant 72 heures,
- germes totaux à 37°C = comptage des colonies obtenues après incubation à 37°C durant 24 heures.

A l'**émergence**, ces valeurs devraient normalement ne pas dépasser respectivement 20 par ml à 20°C en 72 heures et 6 par ml à 37°C en 24 heures, étant entendu que ces valeurs doivent être considérées comme des nombres guides et non comme des concentrations maximales.

LEGIONNELLES

Germe pathogène de l'environnement. Une **eau minérale** ne doit pas contenir de **légionnelles** (leur dénombrement se fait sur 250 ml).

PSEUDOMONAS AEROGINOSA

Germe pathogène de l'environnement. Une **eau minérale** ne doit pas contenir de **Pseudomonas aeroginosa** (leur dénombrement se fait sur 250 ml).

STREPTOCOQUES FECAUX

Ce sont des hôtes normaux de l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud. Ce groupe n'est généralement pas considéré comme pathogène.

Les **streptocoques fécaux** appartiennent à un groupe de streptocoques qui ne sont pas tous d'origine fécale (groupe D). Toutefois, leur recherche associée à celle des **coliformes fécaux** constitue un bon indice de contamination fécale.

Une **eau minérale** ne doit pas contenir de **streptocoques fécaux** (leur dénombrement se fait sur 250 ml).

THÈME 9 : TRAITEMENT - EMBOUTEILLAGE

DEFERRISATION

Traitement d'élimination du fer dissous par oxydation pour former un précipité d'hydroxyde de fer séparé ensuite de l'eau par simple décantation et/ou par **filtration**.

Les eaux minérales chargées en fer à l'**émergence** subissent un traitement de déferrisation, autorisé puisqu'il concerne la séparation d'un élément instable.

Les modalités d'oxydation peuvent être variables : à l'air, à l'air comprimé et sous conditions à l'ozone (voir **démanganisation**).

DEMANGANISATION

Traitement d'élimination du manganèse par oxydation pour former un précipité d'oxyde ou d'hydroxyde de manganèse séparé de l'eau par **filtration**.

Les eaux minérales chargées en Mn à l'**émergence** subissent un traitement de **démanganisation**, autorisé sous condition de ne pas affecter la composition physico-chimique de l'eau et la flore bactérienne existant à l'**émergence**. En effet, le traitement du Mn nécessite une oxydation plus poussée que celle du Fer, généralement assurée par l'ozone dont l'utilisation est très réglementée compte-tenu de son pouvoir bactéricide.

Nota : *Une autre technique de traitement du manganèse, à l'aide de sables manganifères (ou zéolites) est parfois utilisée.*

FILTRATION

La **filtration** est susceptible d'arrêter certains éléments présents dans l'eau. Certains supports existent avec différents seuils de coupure. On peut citer en **eau minérale** :

- les filtres à sable (pour la **filtration** dans le traitement du fer, manganèse)
- les filtres membranaires. On peut noter l'efficacité des filtres en fonction des seuils de coupures pour les filtres membranaires selon le graphique présenté figure 2.

Nota : *Les filtres sur bougies poreuses ont un seuil de coupure qui permet la **filtration** bactérienne entre 2µ et 0,02 µ. Leur utilisation est assimilée à un traitement de désinfection bactérienne non admis pour les **eaux minérales naturelles**.*

NETTOYAGE EN PLACE (NEP)

Le ***nettoyage en place*** (NEP) des réseaux et équipements est réalisé par une unité fixe ou mobile dan laquelle sont préparés les produits de nettoyage (acide stérilisant et/ou soude stérilisante), puis injectés en boucle au moyen d'un tableau de pontage et de **pompe** de circulation.

OZONATION

Technique d'oxydation à l'aide d'air enrichi en ozone. L'ozone beaucoup plus oxydant que l'oxygène es produit par action de décharges électriques sur l'oxygène de l'air.

ANNEXE 1

LEXIQUE DES TERMES DU GLOSSAIRE PAR ORDRE ALPHABETIQUE

Activité radioactive (Bq) 17
Annulaire 10
Aquifère 5
Artésianisme 5
Bactéries sulfitoréductrices 18
Bilan ionique 13
Carbone 14 16
Cimentation 10
Coliformes fécaux ou thermotolérants 18
Coliformes totaux 18
Complétion 10
Conductivité (Unité = µS/cm) 13
Coordonnées Lambert 1
Crépine 10
Débit critique (unité : m^3/h) 5
Débit nominal d'une pompe 10
Débit spécifique (unité : $m^3/h/m$) 5
Déferrisation 20
Démanganisation 20
Deutérium 16
Développement 6
Diagraphies 9
Diamètre de foration / Equipement 10
Dose absorbée (Gy) 17
Dureté (unité : °F) 13
Eau thermale 2
Eau minérale naturelle 2
Eau minérale 1
Emergence 2
Equivalent de dose (Sv) 17
Faciès physico-chimique 13
Filtration 20
Fréquentation 2
Gaz carbonique 14
Gaz du sol 9
Gaz liquide ratio (GLR) 14
Géochimie 9
Géophysique 9
Géothermomètre 9
Germes revivifiables 19
Gisement 6
Interférence 6
Isotopes 16
Karat 14
Karstique (aquifère) 6
Legionnelles 19
Limite Annuelle d'Incorporation (L.A.I.) 17
Majeurs (éléments) 14
Marteau Fond de Trou (M.F.T.) 11
Milliéquivalents et mg/l 14
Nappe captive 7

Nappe libre 7
Nappe superficielle 7
Nettoyage en place 20
Niveau dynamique (unité : m) 7
Niveau piézométrique 7
Niveau statique (unité : m) 7
Numéro BSS 2
Oxygène 18 16
Ozonation 20
Périmètre de protection 3
Périmètre Sanitaire d'Emergence (P.S.E.) 3
Perméabilité (unité : m/s) 7
Point de bulle 11
Pompage d'essai 7
Pompage de qualification 8
Pompe (type et diamètre) 11
Production 3
Protection sanitaire 3
Pseudomonas aeroginosa 19
Rabattement (unité : m) 8
Recaptage 4
Réhabilitation 4
Représentation graphique 15
Résistivité (Unité Ω.cm) 15
Rotary 12
Source 4
Streptocoques fécaux 19
Structurale 9
Télescopage 12
Titre alcalimétrique complet (TAC) 15
Titre hydrotimétrique 15
Transmissivité (unité : m2/s) 8
Tritium 16
Tubage à l'Avancement (T.A.L.) 12
Tubage plein 12
Zone non saturée 8
Zone saturée 8

ANNEXE 2

LEXIQUE DES ABREVIATIONS USUELLES

G.L.R. : Gaz Liquide Ratio (thème 5)

H.M.T. : Hauteur Manométrique Totale (voir Débit nominal d'une pompe - thème 4)

L.A.I. : Limite Annuelle d'Incorporation (Thème 7)

M.F.T. : Marteau Fond de Trou (thème 4)

N.E.P. : Nettoyage En Place (thème 9) = C.I.P. (Cleaning In Place)

T.A.C. : Titre Alcalimétrique Complet (thème 5)

T.A.L. : *Tubage A L'avancement (thème 4)*

BIBLIOGRAPHIE

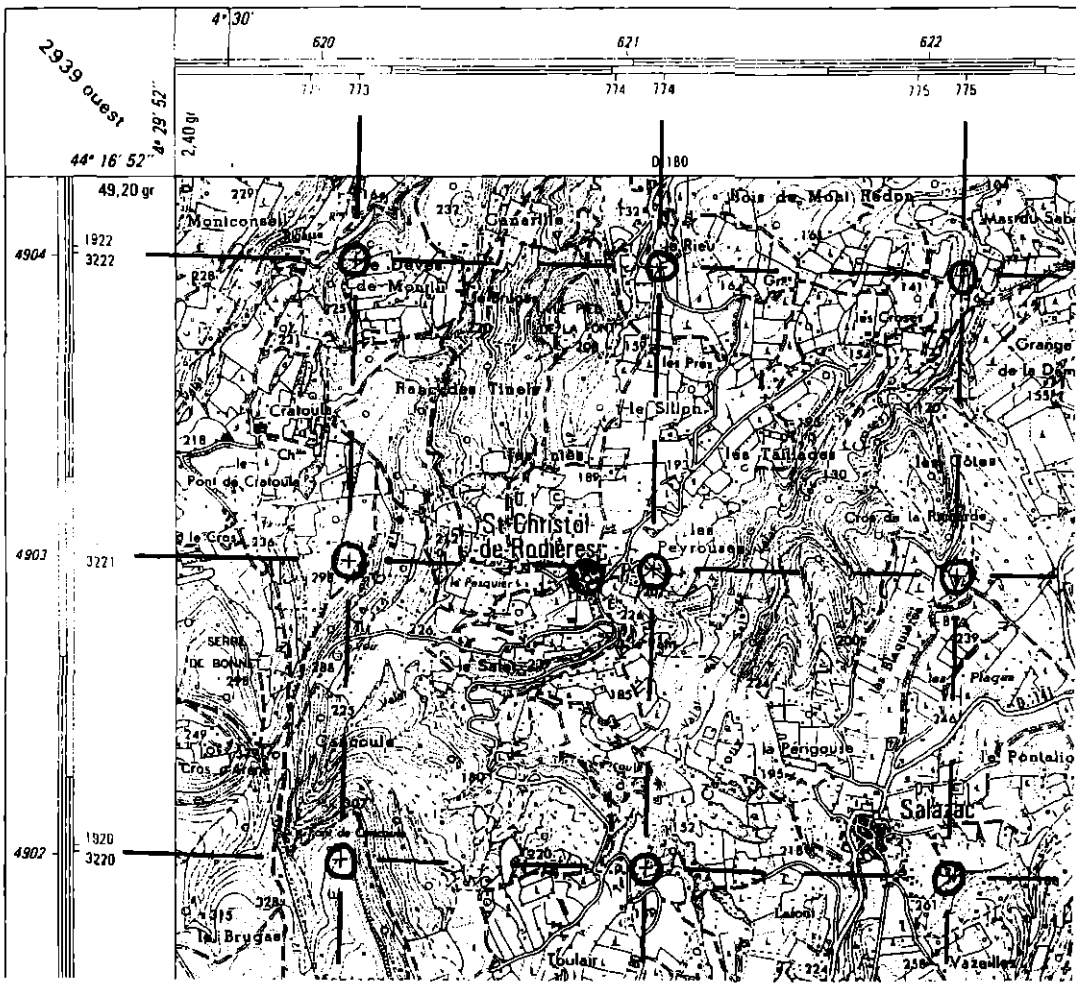
- Guide des études préalables à la définition de périmètres de protection des gisements et captages d'eau minérale - Ministère de l'Industrie - BRGM - Octobre 1995 - R38626

- Dictionnaire Français d'hydrogéologie - BRGM - G. Castany et J. Margat - 1977

- L'Analyse de l'Eau - Jean Rodier - Edition DUNOD 1996 (8ème édition)

- Mémento technique de l'eau - Degrémont - 1989 (9ème édition)

- Guide des Analyses d'eau potable - Dossier d'experts - J.L. Potelon et K. Zysman - Edition de « La lettre du Cadre Territorial» - 1993



Extrait carte IGN 2940 E - 1/25.000° - Bagnols-sur-Cèze / Pont-St-Esprit

◯ **Point référencé sur la carte = village de St Christol de Rodières**

Secteur Sud du 49,20 gr (cf. indication carte) = > zone Lambert III

X = 773,80
Y = 3220,95
Z = 226 m

⊕ **Croix de référence des intersections de coordonnées**

Nota : Les deux échelles de latitudes et longitudes du cadre et les deux numérotations kilométriques correspondent respectivement :

= > vers l'intérieur, aux latitudes et longitudes en grades (longitudes référées au méridien de Paris) rapportées au système géodésique français; les amorces sont celles des quadrillages kilométriques Lambert zone III (chiffrées en noir gras) et Lambert zone II étendu (chiffrées en noir clair);

= > vers l'extérieur, aux latitudes et longitudes en degrés (longitudes référées au méridien International) rapportées au système géodésique européen unifié; les amorces sont celles des quadrillages kilométriques Mercator Transverse Universel fuseau 31 (chiffrées en noir gras) et fuseau 30 (chiffrées en noir clair).

Figure 1 - Coordonnées Lambert - Exemple de détermination sur carte IGN

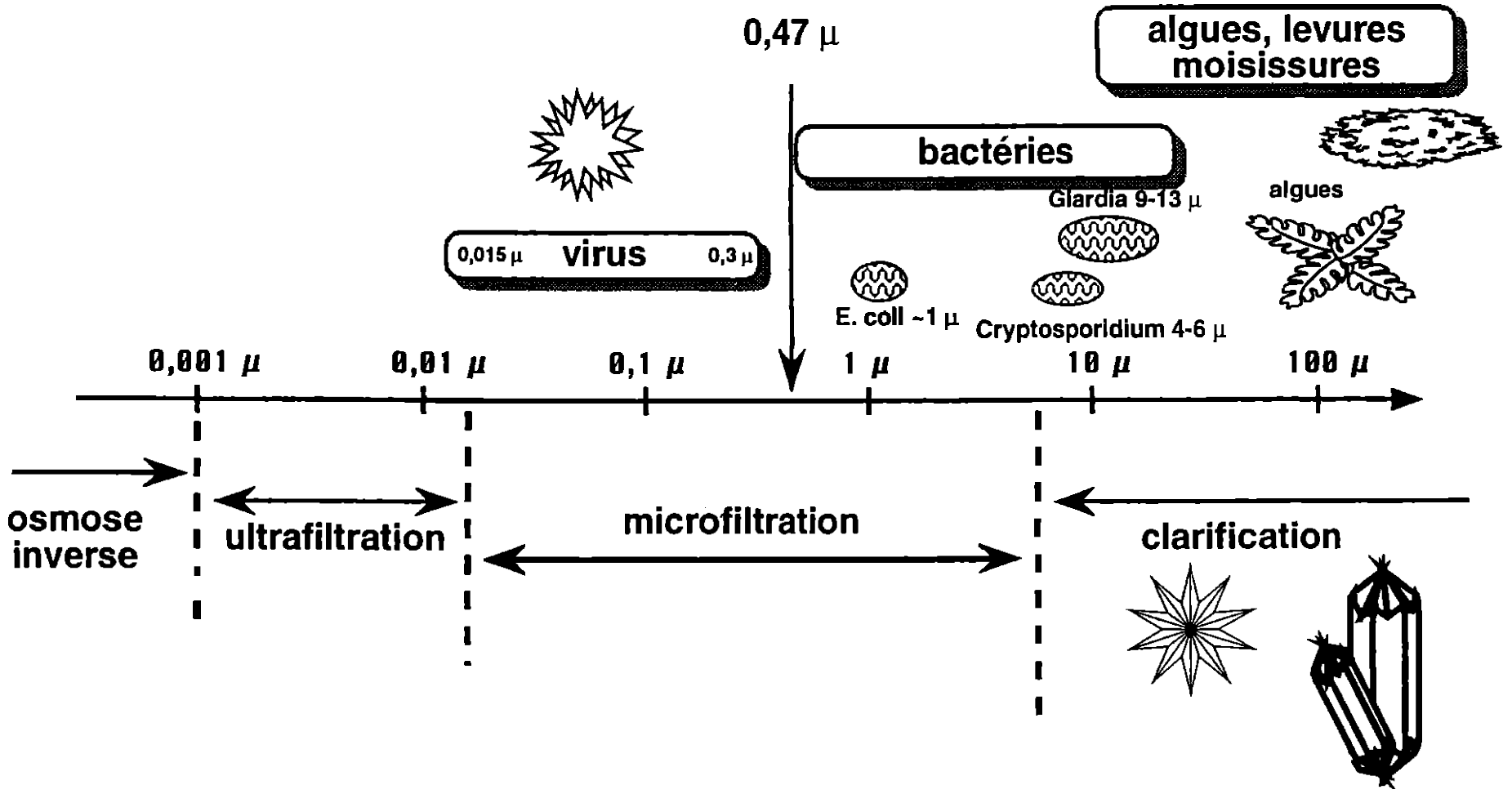


Figure 2 **Filtration - seuil de coupure des membranes pour les analyses bactériologiques (extrait document LNEHT 1997)**

Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie

Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

Les géothermomètres chimiques

Note technique n° 13

Février 1999

DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

AVERTISSEMENT

Les géochimistes éminents, inventeurs des différentes méthodes de géothermométrie chimique ont contribué notablement à faire progresser les outils de la prospection géothermique.

L'étude des gisements d'eau minérale se situe à la limite des possibilités d'application de ces méthodes de géothermométrie chimique ; en effet, dans les contextes hydrogéologiques correspondants, les risques de perturbation des équilibres chimiques profonds sont beaucoup plus importants et la sélection des conditions les plus favorables à l'utilisation de ces méthodes n'est souvent pas évidente.

Ainsi, ces outils de géothermométrie chimique, par leur simplicité d'emploi apparente constituent-ils en réalité un danger ou une illusion ; un calcul de "température profonde" devient apparemment à la portée de tout un chacun, mais c'est oublier que toute la chaîne de raisonnement dont le calcul de température n'est que le point final, est affaire de spécialiste et que la fiabilité du résultat obtenu est fonction directe de la compétence, de l'expérience et de l'honnêteté intellectuelle qui ont été affectées à cette succession de raisonnements.

C'est à la lumière de ces faits que doit être lue la présente note technique.

RESUME

A partir des paramètres de l'analyse chimique d'échantillons de surface, la littérature spécialisée fournit de nombreuses méthodes permettant d'estimer la température atteinte en profondeur par une eau souterraine, existent dans la littérature ; appliquées au début pour les études géothermiques, elles le sont maintenant couramment pour les eaux minérales.

Les méthodes les plus éprouvées sont passées en revue, ainsi que quelques autres moins courantes.

On se doit d'insister sur les précautions d'emploi à respecter ; avant d'appliquer ces méthodes une discussion géochimique préliminaire doit avoir déterminé :

- *la représentativité de* l'échantillon et de l'analyse chimique considérés,

- le respect probable des conditions d'équilibre chimique au niveau du réservoir.

Il convient donc, en première approche, de ne pas surestimer la précision des résultats obtenus : en effet, si les équations correspondant à chaque méthode sont bien définies, les hypothèses successives que l'on est obligé de faire, avant de procéder aux calculs, correspondent à autant d'approximations, qui contribuent dans la plupart des cas à donner au résultat obtenu, un caractère très estimatif.

SOMMAIRE

0. INTRODUCTION 1

1. PRINCIPE GÉNÉRAL 1

2. PRÉCAUTIONS D'EMPLOI 2

3. HYPOTHÈSE DE TRAVAIL 2

4. LE GÉOTHERMOMÈTRE À SILICE 3
Origine de la silice dissoute dans les eaux naturelles 3
4.1. *L'eau est sous-saturée vis-à-vis de la silice amorphe à la température d'émergence* 4
4.2. L'eau est saturée en silice amorphe à la température d'émergence 4
4.3 Modifications secondaires 5

5. LES GEOTHERMOMETRES À CATIONS 5
5.1 Géothermomètres Na/K 5
5.2 Essais de correction : le géothermomètre Na/K/Ca 6
5.3 Le géothermomètre Na/Il 6

6. DÉVELOPPEMENTS, CORRECTIONS 7
6.1 Correction tenant compte du magnésium 7
6.2 Correction tenant compte du CO_2 8

7. AUTRES GÉOTHERMOMÈTRES 9
7.1 Oxygène 18 des sulfates et de l'eau 9
7.2 Géothermomètre basé sur les gaz 9

8 COMMENTAIRES 10
8.1 Empirisme de certaines méthodes 10
8.2 Caractère approximatif 10
8.3 *Dangers et limites d'application* 10

9. CONCLUSION 11

BIBLIOGRAPHIE 12

0. INTRODUCTION

Les méthodes de géothermométrie chimique permettent, à partir de l'analyse des eaux des sources chaudes, de calculer la température à laquelle elles ont été portées dans le sous-sol "au niveau de leur gisement".

Ces méthodes, mises au point pour la prospection de gisements d'énergie géothermique entre 1960 et 1980, ont donné lieu à de nombreuses publications et applications.

Elles sont maintenant couramment utilisées dans les études ayant trait aux eaux minérales dans des conditions parfois discutables, car **si leur mise en œuvre est extrêmement simple, les résultats obtenus peuvent être totalement aberrants, si un travail de réflexion et d'interprétation n'a pas été réalisé au préalable sur la représentativité des échantillons d'eaux considérés**.

1. PRINCIPE GÉNÉRAL

Les eaux minérales, comme les eaux des gisements géothermiques, sont d'origine météorique ; eaux de pluie infiltrées en profondeur dans le sous-sol, elles subissent un réchauffement sous l'influence du gradient géothermique local ; la température maximale à laquelle elles ont été portées dans le sous-sol et la profondeur qu'elles y ont atteinte sont donc liées.

Au cours de leur trajet souterrain sous l'effet de la température, de la pression et de la présence éventuelle de gaz, elles entrent en réaction avec les minéraux constitutifs des roches traversées, qui s'altèrent ; l'eau acquiert ainsi sa minéralisation aux dépens de ces minéraux et, avec le temps, il s'établit un équilibre chimique :

MINÉRAUX DE NÉOFORMATION ↔ EAU MINÉRALISÉE ↔ MINÉRAUX ALTÉRÉS

qui est essentiellement fonction de la température atteinte.

PAR CONSEQUENT, SI CES EAUX ARRIVENT A REMONTER JUSQU'EN SURFACE SANS QUE LEUR COMPOSITION CHIMIQUE N'AIT ETE TROP PERTURBEE, ELLES PEUVENT FOURNIR DES INDICATIONS QUALITATIVES OU QUANTITATIVES SUR LE NIVEAU DE TEMPERATURE AUQUEL ELLES ONT ETE PORTEES DANS LE SOUS-SOL.

Celles-ci peuvent être extrêmement élevées ; des valeurs supérieures à 300°C ont été mesurées dans certains champs géothermiques.

Dans ces conditions deux cas de figures sont distingués dans les champs géothermiques, pouvant donner naissance à deux types de sources très différentes :

a) Les conditions de température et de pression permettent en profondeur la vaporisation de l'eau.

Il y aura transfert de vapeur vers la surface en une succession d'épisodes vaporisation-condensation dans des aquifères moins profonds.

L'eau entre en ébullition à une cote donnée dans le sous-sol, la vapeur remonte vers la surface et généralement se condense dans un aquifère superficiel ; les sources chaudes dans ce cas là seront donc des eaux superficielles, réchauffées par injection de vapeur et leurs caractéristiques physiques et chimiques seront très particulières. Pour résumer, température parfois élevée, minéralisation peu élevée, correspondant à une eau superficielle mais présence de concentrations notables en substances volatiles qui ont migré avec la vapeur d'eau (B, Hg, As, ...).

Ces indications chimiques seront plutôt de type qualitatif, renseignant simplement sur la présence probable d'eau à l'état de vapeur dans le sous-sol.

Des sources de ce type se rencontrent dans les champs géothermiques et les régions de volcanisme actif mais on n'en connaît pas d'exemple en France.

b) Transfert d'eau chaude

Dans le cas le plus fréquent qui correspond notamment aux eaux minérales françaises, l'eau n'entre pas en ébullition dans le sous-sol (sauf éventuellement près de la surface et, même dans ce cas, en général, la fraction de fluide correspondante est négligeable par rapport à la masse totale de fluide concernée) et la remontée vers la surface se fait sous forme d'eau liquide ; si la composition de l'eau n'est pas perturbée par des phénomènes secondaires au cours de sa remontée, la concentration de certains éléments dans les sources de surface pourra être reliée à la température à laquelle s'est établi l'équilibre entre eau et minéraux altérés au niveau du gisement ; ces éléments peuvent sous certaines conditions servir de géothermomètres chimiques.

2. PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

L'usage des géothermomètres chimiques a souvent fait l'objet d'abus, donnant lieu à des erreurs d'interprétation grossières, pouvant avoir des conséquences graves (incidences financières de forages mal conçus sur la base de calculs de températures et de profondeur erronés).

C'est pourquoi les hypothèses fondamentales sur lesquelles repose la bonne utilisation de ces méthodes doivent toujours être présentes à l'esprit :

- **Disponibilité en concentration suffisante du ou des éléments considérés dans la roche réservoir ; cette évidence est parfois oubliée.**

- **L'existence d'un équilibre chimique entre l'eau et les minéraux des roches doit être établi.**

- **Transit rapide de l'eau, depuis le réservoir vers la surface.**

- **Pendant le trajet de remontée, absence de réaction secondaire susceptible de modifier la composition de l'eau.**

- **Absence de dilution ou de mélange de l'eau chaude par de l'eau d'autres nappes moins profondes.**

Une attention particulière doit également être portée quand on a affaire à un groupe de sources, à la sélection des sources les plus représentatives du fluide profond ; on s'accorde ainsi à privilégier les sources présentant par exemple les valeurs de débit, de température et de chlorure les plus élevées.

Enfin, il convient de s'assurer également de la fiabilité des résultats analytiques utilisés.

3. HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

Selon G. Michard, la mise au point de géothermomètres s'intéressera aux réactions suffisamment lentes, surtout à basse température, pour que l'équilibre atteint en profondeur ne risque pas d'être modifié au cours de la remontée et, en même temps, suffisamment rapides, pour que l'équilibre soit atteint dans le réservoir.

La nature de la roche réservoir étant le plus souvent inconnue au départ de l'étude, les géothermomètres chimiques doivent concerner des minéraux suffisamment ubiquistes pour que l'on puisse supposer a priori leur présence. Enfin il est souhaitable que la réaction envisagée ne soit pas trop compliquée et qu'elle ne fasse intervenir qu'un petit nombre d'éléments ...

Dans ces conditions, il existe essentiellement 2 minéraux ou associations minérales intéressants à cet effet :

- la silice, ubiquiste, dont la solubilité augmente rapidement avec la température ;
- le couple feldspath potassique - feldspath sodique (albite) dont le rapport de solubilité peut être représenté par la réaction :

$$K\,Al\,Si_3O_8 + Na^+ \rightarrow Na\,Al\,Si_3O_8 + K^+$$

Ces deux feldspaths n'étant pas miscibles, la loi d'action de masse correspondante montre que le rapport Na/K ne dépend que de la température ; en toute rigueur ce rapport dépend également de la pression, mais, dans les domaines de pression considérés, l'influence de ce paramètre est faible devant l'influence de la température.

4. LE GÉOTHERMOMÈTRE À SILICE

ORIGINE DE LA SILICE DISSOUTE DANS LES EAUX NATURELLES

La silice est l'un des constituants majeurs de l'écorce terrestre ; omniprésente dans les roches magmatiques, elle entre également dans la composition de nombre de roches sédimentaires (argiles, marnes, grès...)

Les différentes variétés allotropiques de la silice (quartz, calcédoine et silice amorphe) se dissolvent en donnant naissance, à l'équilibre, à une variété monomère H_4SiO_4 ; la réaction de solubilisation correspondante est indépendante du pH (jusqu'à pH > 9,5) et de la force ionique de la solution ; la mise en solution est donc essentiellement fonction de la température (fig. 1).

Ces différentes variétés allotropiques ne sont pas les seules sources de silice dissoute dans les eaux naturelles.

Les feldspaths, les pyroxènes, les olivines libèrent également de la silice par action de l'eau.

Très généralement ces minéraux sont beaucoup plus facilement altérables et dans la pratique, la limitation de la silice dissoute est obtenue par précipitation d'une variété allotropique de silice à partir d'une solution où se sont dissous feldspaths, olivines, etc...

La variété allotropique précipitée dépend de la température de la solution [ARNORSSON S. 1975]. Au-dessus de 160°C la forme précipitée est le quartz.

Entre 120 et 160°C précipitent le quartz ou la calcédoine ; au-dessous de 120°C uniquement la calcédoine.

A température ordinaire on peut atteindre la solubilité de la silice amorphe. Dans ce dernier cas, par exemple, l'équilibre est atteint en 40 jours à 20°C.

Les limites de température données ici sont indicatives. Elles dépendent de nombreux facteurs dont le pH de la solution.

La figure 1 montre que les différences entre les courbes en solubilité de la silice amorphe et du quartz sont telles qu'une eau souterraine initialement en équilibre avec le quartz à 150°C par exemple, puis refroidie à 50°C, ne peut atteindre la saturation vis à vis de la silice amorphe : l'équilibre initial sera donc gelé et elle gardera sa teneur initiale en silice, permettant ainsi à contrario l'utilisation de cette concentration en silice pour calculer la température qu'elle a atteint en profondeur.

On peut donc présenter le "géothermomètre" à silice de la façon suivante :

4.1 L'EAU EST SOUS-SATUREE VIS-A-VIS DE LA SILICE AMORPHE A LA TEMPERATURE D'EMERGENCE.

Il s'agit soit d'une eau peu profonde qui a acquis de la silice par altération à basse température, soit d'une eau profonde (chaude) qui s'est équilibrée en profondeur avec le quartz ou la calcédoine. Il est assez facile de distinguer ces deux catégories d'eaux :

- les premières sont généralement très peu minéralisées et ne comportent que très peu de chlorures ; la silice est souvent pratiquement l'espèce dissoute majoritaire (exemple source CLAIRVAL à VOLVIC) ;

- les eaux d'origine profonde (chaudes) sont par contre généralement beaucoup plus minéralisées ; elles peuvent contenir des chlorures en concentration notable (35 mg/l) et par contre la silice est présente à des concentrations relativement modestes (*exemple source* DÔME à ABREST).

Sources	T°C	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	SiO_2
CLAIRVAL (Volvic)	# 10	7,2	5,6	10,2	5,4	6,6	5,4	65,9	33
DÔME (Abrest)	65,5	49,3	9,0	1877	108	342	183	4529	49,5

On peut alors utiliser les concentrations en silice de ces dernières pour calculer leur température d'équilibre avec le quartz ou la calcédoine dans le sous-sol à partir des formules suivantes (qui correspondent aux courbes de solubilité de ces espèces) :

$$T°C = \frac{1309}{5{,}19 - \log SiO_2} - 273{,}15$$

en supposant l'équilibre atteint avec le quartz et :

$$T°C = \frac{1032}{4{,}69 - \log SiO_2} - 273{,}15$$

(concentration en mg/l)

en supposant l'équilibre atteint avec la calcédoine. Au dessus de 160°C, on peut être sûr de la présence de quartz. En dessous, on ne peut choisir entre les deux valeurs qui diffèrent d'environ 25°C.

4.2 L'EAU EST SATUREE EN SILICE AMORPHE A LA TEMPERATURE D'EMERGENCE

La distinction entre eau d'origine peu profonde et eau d'origine profonde est alors plus difficile à faire car les eaux froides de ce type sont également assez concentrées. Des indicateurs qualitatifs (Cl^-, Li^+, Rb^+) peuvent être utilisés, mais il ne s'agit que de corrélations empiriques qui peuvent souffrir des exceptions.

Même si l'on peut affirmer qu'il s'agit d'une eau chaude, on ne pourra obtenir qu'une estimation par défaut de la température profonde.

4.3 MODIFICATIONS SECONDAIRES

Tout ce qui précède n'est valable que si, au cours de la remontée de l'eau, la concentration de silice dissoute n'a pas subi de modification.

Ces modifications peuvent être la conséquence :

- d'un mélange avec des eaux de surface ;
- d'une évaporation ou d'une ébullition ;
- d'une précipitation de silice amorphe ou d'autres phases silicatées.

Certaines de ces perturbations étant fréquemment observées, on a cherché à y remédier par le recours à des géothermomètres faisant appel à des rapports ioniques et donc moins sensibles aux effets notamment de dilutions éventuelles.

5. LES GEOTHERMOMÈTRES À CATIONS

5.1 GEOTHERMOMETRES NA/K

D.E. WHITE [1970, 1965] puis A.J. ELLIS [1970] ont mis empiriquement en évidence la relation entre le rapport Na/K et la température profonde de l'eau

Ils ont mis cette constatation en relation avec l'équilibre :

$$NaAlSi_3O_8 + K^+ \rightarrow KalSi_3O_8 + Na^+$$

Les deux feldspaths n'étant pas miscibles, l'équilibre s'écrit en effet :

$$\frac{|Na^+|}{|K^+|} = K(T).$$

et l'équation correspondante :

$$T°C = \frac{933}{0{,}993 + \log Na/K} - 273{,}15$$

(Concentrations en mg/l)

Avantages et inconvénients du géothermomètre

Faisant intervenir un rapport de concentration, ce géothermomètre est insensible aux *processus de concentration ou de dilution, en particulier au mélange avec des eaux* superficielles qui sont le plus souvent très diluées par rapport aux eaux profondes.

Il est peu sensible aux conséquences d'un refroidissement éventuel et au contact de roches d'origine profonde ; les modifications d'alcalins sont faibles. Par contre, il n'en est pas toujours de même quand il y a un long contact avec des roches sédimentaires.

L'inconvénient le plus sérieux de ce géothermomètre est qu'il suppose l'équilibre atteint. Or il est souvent très difficile de montrer qu'il en est bien ainsi.

L'importance de l'erreur que l'on pourrait commettre est montrée par l'exemple des eaux de surface des régions granitiques ou volcaniques ; le rapport Na/K dans ces eaux est uniquement gouverné par la vitesse relative de dissolution des feldspaths calco-sodique et potassique. Dans la majorité des cas, ce rapport est compris entre 30 et 3 ; l'application du géothermomètre dans ce cas conduirait à des températures allant de 145 à 500°C.

5.2 ESSAIS DE CORRECTION : LE GEOTHERMOMETRE Na/K/Ca

Pour remédier à ces difficultés, R.O. FOURNIER et A.H. TRUESDELL [1973] *ont proposé un* géothermomètre Na-K-Ca.

$$\log \frac{Na}{K} + \beta \log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} = \frac{1647}{T} - 2{,}24$$

Soit :

$$T°C = \frac{1647}{2{,}24 + \log Na/K + \beta \log \sqrt{Ca}/Na} - 273{,}15*$$

**Concentrations exprimées en Moles/l*

On essaye $\beta = 4/3$; si la température trouvée est supérieure à 100°C, on reprend le calcul avec $\beta = 1/3$; sinon $\beta = 4/3$ donne la bonne température. De nature empirique, ce géothermomètre corrige effectivement souvent les températures extrêmement élevées trouvées pour les eaux très diluées. Par contre il donne un résultat aberrant pour l'eau de mer (t = 175°C).

On peut considérer ce *géothermomètre* comme un *garde fou*. Si avec $\beta = 4/3$, on obtient une température inférieure à 100°C, il est préférable de rejeter la température calculée par le Na/K. Mais l'inverse n'est pas vrai.

5.3 LE GEOTHERMOMETRE Na/Li

Il a été défini par G. MICHARD et C. FOUILLAC [1981] à partir d'une étude statistique portant sur des eaux issues de milieux granitiques et de volcanisme acide.

Pour les eaux de salinité modérée (Cl < 10 000 mg/l), ils proposent l'équation :

$$T°C = \frac{1000}{\log Na/Li + 0{,}38} - 273{,}15$$

et pour les saumures (Cl > 10 000 mg/l) :

$$T°C = \frac{1195}{\log Na/Li - 0,13} - 273,15$$

(concentrations exprimées en moles/l)

Il n'y a pas, à l'heure actuelle, d'explication du fonctionnement de ce géothermomètre.

Ces relations ne permettent pas d'obtenir la température avec la même précision que la silice et que, peut-être, le Na/K. On aura une estimation à ± 20°C. Par contre, Na/Li possède deux gros avantages :

- les eaux froides d'origine superficielle obéissent approximativement à la relation thermométrique Na/Li ; nous avons vu qu'il n'en était pas ainsi ni pour la silice ni, surtout, pour le Na/K ;

- les éléments Na et Li ne subissent guère de modifications de concentration lors de la remontée des eaux, beaucoup moins que le potassium. Ainsi, le rapport Na/Li des sources naturelles de Waïrakei (Nouvelle-Zélande) aurait permis de déterminer avec exactitude la température profonde (250°C), alors que Na/K ne donne que 170°C à cause de la perte de 40 % du potassium au cours de la remontée.

Le géothermomètre Na/Li est donc un géothermomètre un peu grossier, mais très sûr. Au minimum, il pourra être utilisé pour discuter la signification des températures données par la silice et le Na/K.

6. DÉVELOPPEMENTS, CORRECTIONS

De nombreux efforts ont été réalisés, après la mise au point de ces 3 méthodes de géothermométrie, afin de tenter d'en étendre et d'en affiner l'utilisation ; des possibilités de correction ont ainsi été introduites concernant le géothermomètre Ca, Na, K.

6.1 CORRECTION TENANT COMPTE DU MAGNESIUM (R.O. FOURNIER et R.W. POTTER [1979])

- On calcule la température T (Ca, Na, K) ; si le résultat est inférieur à 70°C, aucune correction n'est appliquée.

- On calcule l'expression R = [Mg/(Mg+Ca+K)] x 100, les concentrations étant exprimées en équivalents/l.

- Si R > 50, on admet que l'eau de la source provient d'un aquifère peu profond à une température voisine de celle de la source, sans tenir compte de la température calculée au moyen du géothermomètre.

- Si la température (Ca,Na,K) calculée est supérieure à 70°C et R < 50, utiliser les abaques 1 et 2 présentées à la figure 2, pour déterminer Δt (Mg) qui est la correction de température en°C à soustraire de T (Ca,Na,K).

6.2 CORRECTION TENANT COMPTE DU CO_2 (T. PACES [1975])

Pour des eaux chaudes issues de terrains granitiques, des températures à l'émergence inférieures à 75°C et en présence de CO_2 (pCO_2>10 atm), celui-ci a observé une déviation systématique du géothermomètre Ca, NA, K, qu'il attribue au fait que dans ces conditions, l'équilibre chimique ne peut être atteint ; il propose donc d'appliquer, dans ces cas de figure, un facteur de correction, *déduit de l'abaque présentée par la figure 3.*

L'équation devient donc $T°C = \left[1647 / 2.24 = (\log Na / K + \beta \log \sqrt{Ca / Na) - 1}\right] - 273{,}15$

7. AUTRES GÉOTHERMOMÈTRES

7.1 OXYGENE 18 DES SULFATES ET DE L'EAU

R.M. LLOYD [1968] et Y. MIZUTANI et R.A. RAFTER [1969] ont défini une relation montrant la dépendance du fractionnement isotopique de l'oxygène 18 des sulfates et de l'eau vis à vis de la température ; le temps nécessaire à la réalisation de l'équilibre isotopique est inversement proportionnel à la température, mais ceci est compensé pour les eaux chaudes par des durées de transit souterrain généralement importantes.

Ce géothermomètre est moins sensible que les autres aux phénomènes de dilution, par contre il peut être influencé par des apports de sulfates secondaires ou des phénomènes d'oxydation de sulfures en sulfates. Il semble cependant relativement fiable et présente l'avantage de faire appel à des paramètres indépendants des autres méthodes.

Les formules proposées par des 2 auteurs sont :

$$1000 \ln x = 3{,}25\ (10^6/T^2) - 5{,}6 \qquad \text{(LLOYD 1968)}$$

et

$$1000 \ln x = 2{,}88\ (10^6/T^2) - 4{,}1 \qquad \text{(MIZUTANI et RAFTER 1969)}$$

$$\text{avec } x = \frac{1000 + \delta^{18}O\,(SO_4)}{1000 + \delta^{18}O\,(H_2O)}$$

et T en °Kelvin.

Cette méthode n'est malheureusement pas souvent utilisée car des déterminations de ^{18}O des sulfates ne sont pas souvent disponibles. D. GARCIA [1986] l'a testée sur les sources chaudes des Vosges méridionales et conclut à sa fiabilité.

7.2 GEOTHERMOMETRE BASE SUR LES GAZ

F. D'AMORE et C. PANICHI [1980] ont appliqué les relations :

$$T°C = [24775/(\alpha+\beta+36{,}05)] - 273{,}15$$

$$\text{avec } \alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2} \text{ et } \beta = -7 \log pCO_2,$$

(concentrations en % en volume)

à 34 systèmes thermaux dont les températures reconnues varient de plus de 300°C à 60°C avec des résultats apparemment satisfaisants.

NB_1 : *en cas d'absence de H_2, H_2S ou CH_4, on prend par convention, pour le calcul % vol $\leq 0{,}001$.*

NB_2 : *pCO_2 représente les valeurs de la pression partielle de CO_2 au niveau du réservoir, qui doit le plus souvent être estimée. Des considérations statistiques ont amené les auteurs à proposer pour ce faire les règles suivantes :*

a) pCO_2 = 0,1 atm si CO_2 (% vol) < 75
b) pCO_2 = 1 atm si CO_2 (% vol) > 75
c) pCO_2 = 10 atm si CO_2 (% vol) > 75 et $CH_4 > 2H_2$ et $H_2S > 2H_2$

Cette contrainte d'estimation de la pCO_2 constitue l'inconvénient majeur de cette méthode, une erreur d'un ordre de magnitude dans cette estimation pouvant entraîner une incertitude de ± 16 à ± 28 % dans le calcul de température.

8. COMMENTAIRES

Plusieurs points méritent d'être soulignés.

8.1 EMPIRISME DE CERTAINES METHODES

Si les méthodes de géothermométrie faisaient appel à la solubilité de la silice, les rapports Na/K et les isotopes de l'oxygène reposent sur des bases scientifiques suffisamment établies et vérifiés par l'expérience, les autres méthodes sont toutes des méthodes empiriques uniquement basées sur l'observation statistique ; de plus beaucoup des méthodes décrites ici ne sont que des extensions de la méthode Na/K (par exemple Na K Ca) ou de cette dernière en y introduisant des corrections qui ne sont applicables que dans certains cas particuliers ; on ne dispose donc en réalité que de 3 méthodes chimiques indépendantes :

- SiO_2
- Na/K et Ca/Na/K
- Na/Li

et d'une méthode isotopique (oxygène ^{18} des sulfates et de l'eau).

La méthode basée sur le gaz n'est citée que pour mémoire, car on ne dispose pas d'information suffisante sur son champ d'application.

8.2 CARACTERE APPROXIMATIF

La précision apparente des équations proposées par les inventeurs des différentes méthodes ne doit pas faire illusion.
En effet, la justification de leur bon usage repose sur une accumulation d'hypothèses et de postulats que l'on est amené à poser quant au comportement de l'eau dans le sous sol ; il suffit que l'une de ces hypothèses ne soit vérifiée que de façon approchée et il s'ensuivra une cause d'erreur majeure dépassant de loin les niveaux d'incertitudes normalement admissibles.

8.3 DANGERS ET LIMITES D'APPLICATION

Les géothermomètres chimiques peuvent être considérés comme des méthodes dangereuses car trop faciles d'emploi et si elles sont utilisées sans un raisonnement géochimique préalable approfondi, portant sur la représentativité des échantillons d'eau considérée ; elles ne serviront alors qu'à meubler un rapport d'étude de données "spectaculaires" mais pouvant être totalement fausses.

C'est pourquoi, lors de la lecture critique d'une étude, une attention particulière dans toute la mesure du possible, doit être apportée à l'évaluation objective des justifications techniques, des arguments, des raisonnements qui aboutissent au choix de la ou des méthodes utilisées, ou qui amènent, parmi un ensemble de résultats souvent hétérogènes voire contradictoires, à retenir une valeur comme étant "la plus représentative" ou "la plus vraisemblable".

L'analyse discriminatoire préalable doit porter sur deux points majeurs :

- Peut-on admettre que l'émergence considérée est bien représentative de ce qu'est l'eau au niveau du gisement et qu'elle n'a été ni mélangée ni diluée ? Bien souvent il n'existe pas de réponse claire à cette question et on se contente d'admettre que parmi la population d'émergences considérée, celle qui est la plus minéralisée et la plus chaude est la plus représentative, mais sans pouvoir affirmer qu'elle l'est réellement (c'est la moins mélangée, mais on ne peut affirmer qu'elle ne l'est pas également).

- Peut-on admettre que l'équilibre chimique eau-roche était atteint en profondeur ? On peut maintenant répondre de façon plus scientifique à cette question en ayant recours aux programmes de calcul qui permettent, à partir des paramètres de l'analyse de recalculer les index de saturation de l'eau vis à vis des minéraux et vérifier ainsi la possibilité d'application des différentes méthodes de géothermométrie.

9. CONCLUSION

A défaut de réponse claire à ces deux questions fondamentales, on peut, faute de mieux, adopter la démarche pragmatique proposée par G. Michard qui applique en France ces méthodes pour l'établissement d'une carte des températures de réservoirs alimentant les sources thermales en France :

- Utilisation de 3 géothermomètres :

  . silice
  . Na/K ou sa correction Na/K/Ca
  . Na/Li

- Définition de 4 niveaux de certitude :

  a) Température estimée avec certitude :

  . indications concordantes des 3 méthodes et existence d'une discussion de leur condition d'application.

  b) Température estimée très certainement significative :

  . concordance de 2 géothermomètres
  . explication de la discordance du 3ème

  c) Température estimée douteuse :

  . 1 seule méthode est interprétable quantitativement
  . informations qualitatives des 2 autres méthodes

  d) Température non significative

BIBLIOGRAPHIE

- F. D'Amore et C. Panichi (1980) - Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer
  Geochimica et cosmochimica acta - Vol 44 p. 549-556

- S. Arnorsson (1983) : Chemical equilibrian in Icelandic geothermal systems - Geothermics Vol 12 - p.119-128

- A.J. Ellis (1979) : Chemical geothermometry in geothermal systems - Chemical geology 25 - p. 219-226

- C. Fouillac et G. Michard (1981) : Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs - Geothermics Vol 10 n° 1 - pp. 55-70

- R.O. Fournier (1979) : a revised equation for Na/K geothermometer Geothermal Resources Council - Transactions Vol 3 p. 221-224

- R.O. Fournier et R.W. Potter (1979) : Magnesium correction to the Na K Ca geothermometer - Geochimica et cosmochica acta Vol 42 p. 1543-1550

- R.O. Fournier et AM Trusdell (1973) : An empirical Na K Ca - Geothermometer for natural waters - Geochimica et cosmochimica acta vol 37 p. 1255-1275

- D. Garcia (1986) Etude isotopique et geochimique des eaux thermales des Vosges méridionales - Document du BRGM n° 112

- R.M. Lloyd (1968) Oxygen isotope behavior in the sulfate water system : Journal of geophysical research vol 73 n° 18 p. 6099-6110

- W.F. Mackenzie et A.H. Truesdell (1977) geothermal reservoir temperatures estimated from the oxygen isotope compositions of dissolved sulfate and water from hot springs - Geothermics Vol 5 p.51-61

- G. Michard (1979) Géothermomètres chimiques - Bull. BRGM section III n° 2 p.183-189

- G. Michard et C. Fouillac (1976) Remarques sur le géothermomètre Na K Ca - Journal of volcanology and geothermal research (1) p.297-304

- T. Paces (1975) A systematic deviation from Na K Ca geothermometer below 75°C and above 10^{-4} atm pCO_2 - Geochimica et Cosmochimica acta vol 39 p. 541-544

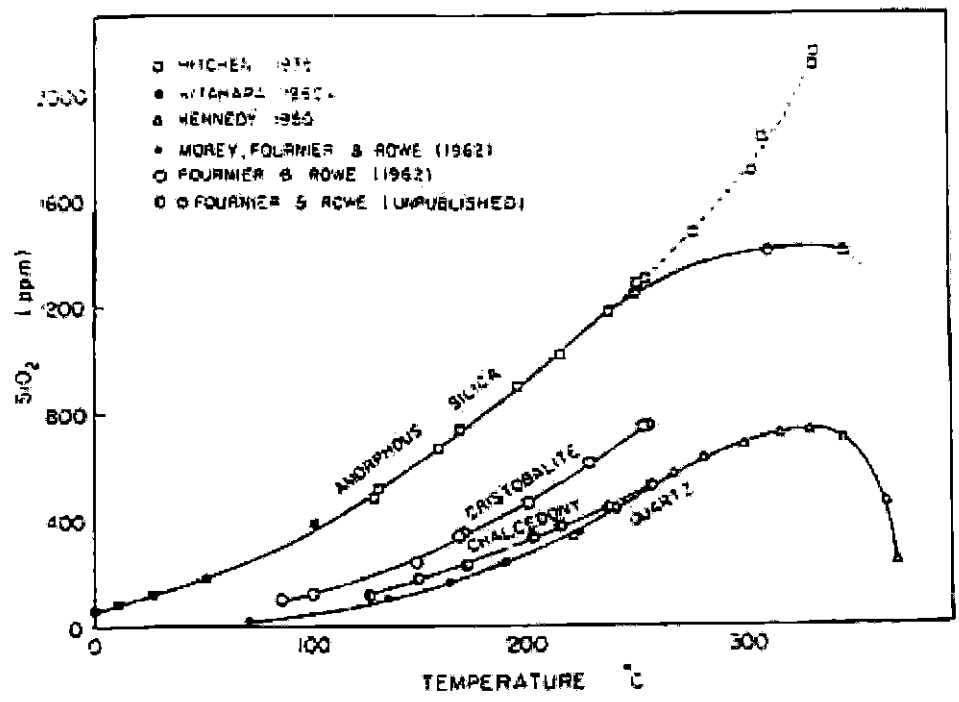
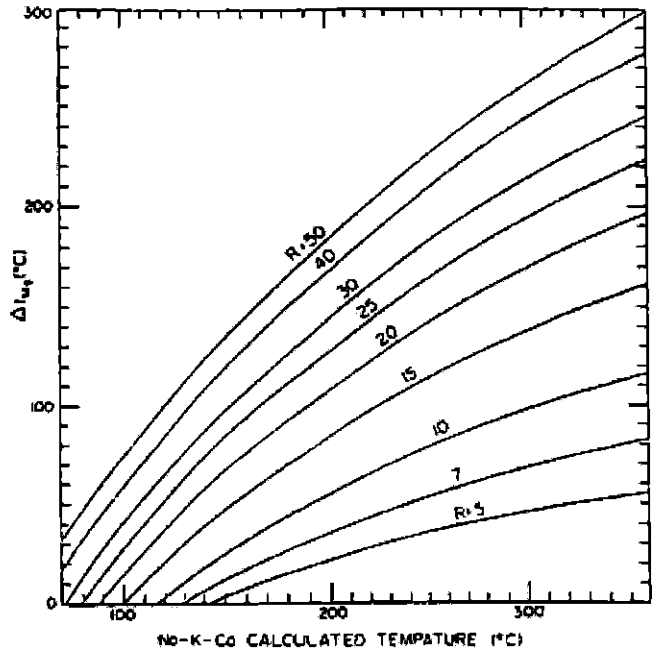
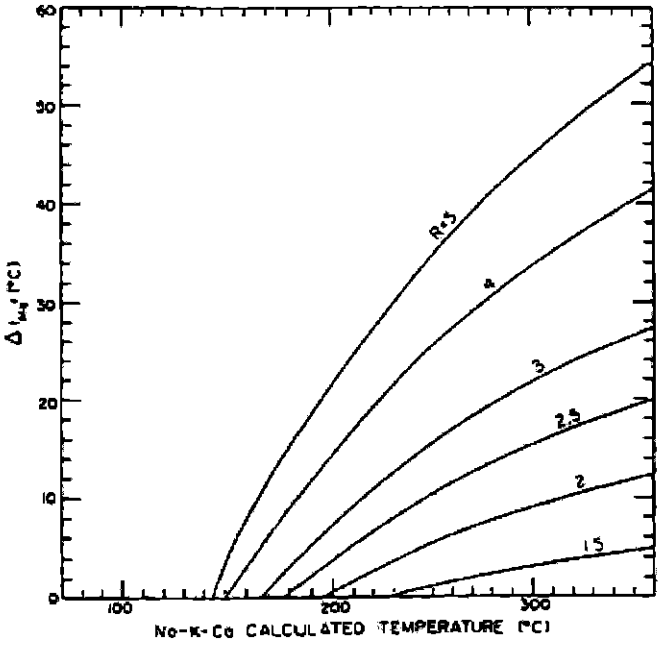


Figure 1 - Solubilité des différentes espèces de la silice en fonction de la température (Données expérimentales)

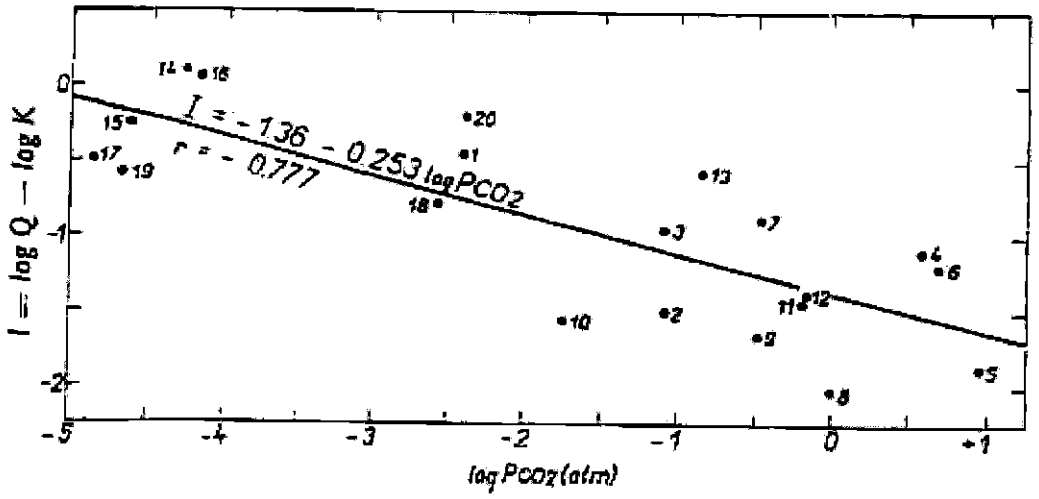


Abaque 1 : Estimation de la correction Delta T(Mg) à appliquer à la température T°(Ca,Na,K) pour 5<R<50



Abaque 2 : Estimation de la correction Delta T(Mg) à appliquer à la température T°(Ca,Na,K) pour 1,5<R<5

Figure 2 - Abaques de correction tenant compte du magnésium



Abaque 3 : Estimation du facteur I en fonction de P(CO2)

Figure 3 - Abaques de correction tenant compte du CO2

Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie

Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

Le traitement du fer et du manganèse dans les eaux minérales

Note technique n° 14

Mars 1999

DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

RÉSUME

Le fer et le manganèse, abondants à l'état naturel dans tout type de roches se retrouvent à l'état dissous dans bon nombre d'eaux souterraines, dont les eaux minérales. Ces deux éléments sont solubles à l'état réduit mais insolubles à l'état oxydé.

Les recours de plus en plus généralisé au captage de ces eaux à profondeurs relativement importantes implique que le captage se faisant en milieu réducteur et l'exploitation ou le conditionnement en milieu aéré, il va être nécessaire d'éliminer le fer et le manganèse ou d'en abaisser les concentrations, afin d'éviter des désagréments organoleptiques, ou de se conformer à des normes de qualité chimique dans la bouteille.

Différents procédés existent depuis fort longtemps ; mis au point dans un premier temps pour le traitement des eaux potables, ils ont été transposés au domaine des eaux minérales, avec cependant toutes les contraintes particulières de mise en œuvre imposées par la réglementation spécifique à ces eaux.

De plus dans les mêmes conditions de captage, on observe également souvent la présence d'ammonium dissous qui, le cas échéant, vient encore compliquer la mise en œuvre des procédés de traitement envisageables.

SOMMAIRE

A. GÉNÉRALITÉS 1

1. Point de vue réglementaire 1

2. Présence dans les eaux minérales 3

3. Normes 4

B. TRAITEMENT DU FER ET DU MANGANÈSE – APPROCHE THÉORIQUE 5

4. L'oxydation 5
   4.1 Aération 5
   4.2 Ozonation 6

5. Les catalyseurs 7

6. Pré-séparation 8
   6.1 La décantation 8
   6.2 La flottation 8
   6.3 La filtration 8

7. Le traitement biologique 10

C. ENQUÊTE DE TERRAIN 12

D. SYNTHÈSE DES POINTS DE VUE ET DES PROBLÈMES RENCONTRÉS 13

8. Les espèces chimiques 13
   8.1 Le fer 13
   8.2 Le manganèse 13
   8.3 L'ammonium 13
   8.4 L'arsenic 14

9. Les procédés utilisés 14
   9.1 L'aération 14
   9.2 L'ozonation 15
   9.3 Procédés biologiques 15
   9.4 Les matériaux manganifères 16

10 Les eaux minérales plates et les eaux minérales gazeuses 18
   10.1 Les eaux minérales plates 18
   10.2 Les eaux minérales gazeuses 19

11 Conclusions générales 20

A. GÉNÉRALITÉS

1. POINT DE VUE RÉGLEMENTAIRE

La directive du Conseil n° 80/777/CEE du 15 juillet 1980 (modifiée par la directive 96/70/CE du 28 octobre 1996) précise en son article 4 :

« 1) Une eau minérale naturelle, telle qu'elle se présente à l'émergence ne peut faire l'objet d'aucun traitement autre que :

a) la séparation des éléments instables, tels que les composés du fer et du soufre, par filtration ou décantation éventuellement précédée d'une oxygénation, dans la mesure où ce traitement ne modifie pas la composition de cette eau quant aux constituants essentiels qui lui confèrent ses propriétés ;

b) la séparation des composés du fer, du manganèse et du soufre, ainsi que de l'arsenic de certaines eaux minérales naturelles à l'aide d'un traitement par l'air enrichi en ozone, dans la mesure où ce traitement ne modifie pas la composition de l'eau quant aux constituants essentiels que lui confèrent ses propriétés, et sous réserve que :

- ce traitement satisfasse aux conditions d'utilisation qui seront déterminées selon la procédure prévue à l'article 12 et après consultation du comité scientifique de l'alimentation humaine institué par la décision 95/273/CE de la commission ;

- le traitement soit notifié aux autorités compétentes et fasse l'objet d'un contrôle spécifique de la part de celles-ci ;

c) La séparation des constituants indésirables autres que ceux spécifiés aux points a) ou b), dans la mesure où ce traitement ne modifie pas la composition de l'eau quant aux constituants essentiels qui lui confèrent ses propriétés, et sous réserve que :

- le traitement soit conforme aux conditions d'utilisation qui seront déterminées selon la procédure prévue à l'article 12 et après consultation du comité scientifique de l'alimentation humaine ;

- le traitement soit notifié aux autorités compétentes et fasse l'objet d'un contrôle spécifique de la part de celles-ci ;

d) l'élimination totale ou partielle de gaz carbonique par des procédés exclusivement physiques.

2) Une eau minérale naturelle, telle qu'elle se présente à l'émergence, ne peut faire l'objet d'aucune adjonction autre que l'incorporation ou la réincorporation de gaz carbonique dans les conditions prévues à l'annexe I point III.

3) En particulier, tout traitement de désinfection par quelque moyen que ce soit et, sous réserve du paragraphe 2, l'adjonction d'éléments bactéricides ou tout autre traitement de nature à modifier le microbisme de l'eau minérale naturelle sont interdits.

..... »

En outre, le décret n° 89/369 du 6 juin 1989 (modifié par le décret n° 98-1090 du 4 décembre 1998) précise (articles 12 et 12 bis) :

« Art. 12. – L'article 3 du décret du 28 mars 1957 susvisé est remplacé par les dispositions suivantes :

« Art. 3 – Une eau minérale naturelle, telle qu'elle se présente à l'émergence, ne peut faire l'objet d'aucun traitement ou adjonction autres que ceux autorisés par arrêté ministériel et relatifs à :

1. la séparation des éléments instables, par décantation ou filtration, éventuellement précédée d'une oxygénation, ce traitement ne devant pas avoir pour effet de modifier la composition de l'eau dans ses constituants essentiels ;

2. l'élimination de gaz carbonique libre par des procédés exclusivement physiques ;

3. l'incorporation ou la réincorporation de gaz carbonique.

Ces traitements ou adjonctions ne doivent pas avoir pour but ou effet de modifier les caractéristiques microbiologiques de l'eau minérale naturelle.

La même autorisation peut prévoir le transport de l'eau à distance par des canalisations ainsi que son mélange à des eaux de propriétés analogues et de même origine géologique et, le cas échant, à des gaz provenant de ces mêmes eaux. »

Art. 12 bis. – Sans préjudice des traitements ou adjonctions mentionnés à l'article 3 du décret du 28 mars 1957 modifié susvisé, une eau minérale naturelle, telle qu'elle se présente à l'émergence, peut également faire l'objet des traitements suivants :

- la séparation des composés du fer, du manganèse et du soufre, ainsi que de l'arsenic, à l'aide d'air enrichi en ozone ;

- la séparation de constituants indésirables.

Un arrêté du ministre chargé de la santé, du ministre chargé de la consommation et du ministre chargé de l'industrie, pris après avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, fixe les conditions techniques à respecter pour appliquer les différents types de traitements mentionnés au premier alinéa.

L'application de ces traitements ne doit pas modifier la composition de l'eau minérale naturelle dans ses constituants essentiels, ni avoir pour but de modifier les caractéristiques microbiologiques de l'eau. »

2. PRÉSENCE DANS LES EAUX MINÉRALES

Le tableau 1, extrait du fichier des sources d'eau minérale de la DNEMT du ministère de l'industrie, montre les teneurs en Fe et Mn relevées à l'émergence dans quelques eaux minérales.

Pour ce qui est du fer on note les valeurs de 46 mg/l (Badoit généreuse), 40 mg/l (Saint Diery, source Renlaigue), 20 mg/l (Grande source du Volcan à Aizac).

Pour le manganèse, les valeurs les plus élevées ont été mesurées à la source Catherine de Bourbon (Salies de Béarn 4,3 mg/l), Diva 1 à Quezac (1,9 mg/l), Grande source du Volcan à Aizac (2,5 mg/l).

Il est remarquable de constater que la plupart des sources figurant dans le tableau 1 sont constituées par des eaux gazeuses.

Tableau 1 - Teneur en Fe et Mn de quelques eaux minérales

Dpts	Communes	Noms	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
03	Saint Yorre	Jean Fery	2,65	0,25
07	Aizac	Grande Source du Volcan	20,3	2,5
	Prades	Vernet Ouest	7,9	0,5
	Vals les Bains	L'Emery	7,6	0,78
		Saint Jean Lachaud	2,7	0,95
12	Cransac	Geneviève	3,1	1,1
17	Rochefort	Empereur	6,7	0,12
20	Rapaggio	Sorgente Sottana	31,3	3
21	Magnien	Romaine	0,16	1,8
34	Lamalou les Bains	Ancienne	21	1,6
	Les Aires	La Vernière	4,2	0,5
	Salvetat sur Agout	Rieumajou-Est	12,6	0,98
42	Saint Alban	Forage St Alban	3,64	1,47
	Saint Galmier	Badoit Généreuse	46	0,6
		Badoit Ouest	0,8	0,8
48	Quezac	Diva 1	9,4	1,9
57	Amnéville	Saint Eloi	14,6	0,7
58	St Parize le Châtel	Elysée	7,9	1,4
63	Chateldon	Sergentale	8,7	1,2
	Ardes sur Couze	Chabetout	10,1	0,3
	St Diery	Renlaigue	40	1,20
64	Salies de Béarn	Catherine de Bourbon	10,7	4,3
67	Preuschdorf	Helions II	5,4	1,66
83	Le Luc	Sophie	0,014	0,4
974	Cilaos	Irénée	7,2	0,68

3. NORMES

Il n'existe pas à l'heure actuelle de normes, applicables aux eaux minérales, concernant le fer et le manganèse.

Dans ses travaux préparatoires, la commission du Codex Alimentarius propose pour le manganèse une valeur limite de 2 mg/l, ce qui est large.

Néanmoins, si l'on se fixe comme règle que les traitements appliqués aux eaux minérales ont pour objectif d'éviter l'apparition de nuisances organoleptiques, on peu considérer que les techniques mises en œuvre auront pour but de ramener les concentrations présentes en deçà des normes de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine à savoir 0,2 mg/l pour Fe^{++} et 0,05 mg/l pour Mn^{++} (Décret du 3.1.1989).

B. TRAITEMENT DU FER ET DU MANGANÈSE : APPROCHE THÉORIQUE

Il consiste en 3 étapes de base :

- une première étape d'oxydation et de précipitation du fer et du manganèse ;
- une pré-séparation éventuelle de ces substances précipitées peut être réalisée par décantation ou flottation ;
- une filtration qui élimine définitivement le fer et le manganèse dans l'eau traitée.

C'est en modulant les différentes combinaisons de ces étapes que l'on doit arriver à mettre au point des solutions techniques adaptées aux différents types d'eau.

4. L'OXYDATION

Dans les eaux naturelles, dont le pH est supérieur à 4, le fer dissous est nécessairement divalent et il suffit de l'oxyder en fer ferrique pour obtenir sa précipitation et sa séparation. Il en est de même pour le manganèse qui, de Mn (II) dissous passe à des oxydes de Mn (IV) solides. Cette oxydation peut s'effectuer par simple aération (par l'air ou par l'oxygène). Mais elle est alors relativement inefficace pour l'élimination du manganèse qui peut nécessiter l'emploi d'oxydants plus forts comme l'ozone (ou pour les eaux banales le chlore, le bioxyde de chlore ClO_2, ou le permanganate).

Par ailleurs, l'utilisation de catalyseurs peut être très efficace pour compléter cette étape.

4.1 Aération

Cette étape constitue dans tous les cas le premier stade du traitement ; indépendamment de l'oxydation du fer et du manganèse dissous, elle permet également l'élimination éventuelle de H_2S, et d'apporter l'oxygène nécessaire à la nitrification éventuelle de l'ammonium.

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

$$4Fe^{2+}_{(aq)} + O_2 + 10H_2O \triangle 4\underline{Fe(OH)_3} + 8H^+ \quad ①$$

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

- L'oxydation du manganèse s'écrit :

$$2\,Mn^{++}_{(aq)} + O_2 + 2H_2O \square 2\,\underline{MnO_2} + 4\,H^+$$

Cinétique d'oxydation

La vitesse d'oxydation est favorisée par l'augmentation du pH et de la pression partielle d'oxygène.

A titre de comparaison, le tableau ci-après montre que l'oxydation du fer est généralement rapide pour un pH > 7 et il faut un pH > 9 pour que le manganèse précipite en deux heures ;

	pH	Temps d'oxydation
Fe	< 7 > 7,5	2 heures 1/4 d'heure
Mn	< 9 > 9,5	> 4 heures 2 heures

En l'absence de traitement chimique, dans le domaine de pH des eaux naturelles (proches de la neutralité), on constate instantanément, que si le traitement du fer par oxydation à l'air est envisageable, l'élimination du manganèse, de par sa cinétique beaucoup plus lente, entraînerait des installations extrêmement importantes correspondant à des durées d'oxydation inenvisageables au niveau industriel.

Techniques d'aération

- Ruissellement en nappe mince : l'eau chute d'un étage à l'autre, en lame mince, en cascade sur une série de déversoirs (aérateur à plateaux avec ou sans pulvérisation, à tirage naturel d'air ou avec ventilation ou aération sur colonne à garnissage).

- Aération par barbotage : injection de l'air dans l'eau.

- La pulvérisation de l'eau : elle est effectuée par des tuyères placées sur un ou plusieurs collecteurs ramifiés qui ont pour but d'augmenter l'interface air-eau.

- L'injection d'air ou d'oxygène surpressé, permet de disperser le gaz sous pression dans la masse liquide.

  Une comparaison de la pulvérisation et de l'aération sous pression montre qu'à perte de charge égale, la longévité (en heures) et la capacité de rétention des filtres (en g de Fe/m²) sont plus faibles pour la deuxième méthode.

4.2Ozonation

L'ozone est produit à partir de l'oxygène de l'air ambiant par l'utilisation de décharges électriques, de radiations isotopiques ou de méthodes chémonuclaires :

$$3\,O_2 \rightleftharpoons 2O_3$$

L'oxydation du manganèse se fait selon :

$$Mn^{++}_{(aq)} + 0_3 + H_2O \triangle \underline{MnO_2} + O_2 + 2H^+$$

Elle fait théoriquement intervenir 0,87 mg d'O_3 pour oxyder 1 mg de Mn^{++} ; mais en réalité, la dose nécessaire est comprise entre 1,5 et 5 fois la teneur en Mn^{++}.

En effet, O_3 agit de façon très complexe :

- par son pouvoir redox ;
- par des réactions d'addition qui entraînent la formation d'ozonides instables ;
- par l'effet catalytique au niveau de l'O_2 présent dans l'air ozoné.

Généralement, le temps de contact est de 2 à 6 minutes. Mais pour améliorer une éventuelle étape de floculation, le temps de contact doit être plus court (environ 2 minutes) et la vitesse de traitement telle que l'ozone résiduel commence juste à apparaître dans l'eau (teneur < 0,1 mg/l d'O_3).

. Les avantages de l'utilisation de l'ozone sont nombreux : elle permet une oxydation rapide et efficace du fer dans un milieu acide (alors que l'oxydation par l'air demande un pH supérieur ou *égal à 8 de préférence*).

Elle évite théoriquement l'utilisation de produits chimiques puisque l'ozone est produit à partir de l'O_2 de l'air.

D'autre part, l'excès de réactif se détruit rapidement dans l'eau traitée du fait de sa grande instabilité.

. Mais elle présente certains inconvénients :

Sa mise en œuvre est coûteuse ; de plus, il a été démontré que l'ozonation, surtout à faible dose, *entraînait parfois* la formation de composés organiques plus complexes que les composés préexistants dans l'eau, composés qui peuvent favoriser la clarification mais persister dans l'eau clarifiée. Il faut alors procéder à une oxydation plus poussée (postozonation) ou à une rétention par adsorption (charbon, actif), voir les deux pour plus de sécurité.

De plus, si l'oxydation est trop forte, elle peut aboutir à la redissolution du manganèse sous forme de MnO_4- (créant une eau rose). Par ailleurs, l'ozonation appliquée à des eaux contenant des bromures peut entrainer la formation de bromates considérés comme cancérigènes.

Enfin, pour ce qui concerne les eaux minérales, son impact sur la flore banale de l'eau, bien que n'étant pas évalué est certainement important. **Il convient de rappeler que si le principe du recours à l'air ozoné est admis dans la Directive Européenne et le décret du 6 juin 1989 (cf § 1), les arrêtés précisant ses conditions d'emploi ne sont toujours pas parus.**

5. LES CATALYSEURS

On a observé un phénomène de catalyse sans apport extérieur, qui était du à la présence dans les filtres utilisés de dépôts antérieurs de MnO_2 ou de $Fe(OH)_3$; elle rend dans certains cas possible l'oxydation de $Mn0_2$ dans des délais raisonnables et à un pH compatible avec les eaux naturelles (□ 7.5).

Pour exploiter cette propriété, on utilise maintenant des matériaux filtrants préconditionnés :

- nodules polymétalliques
- sable plus pyrolusite (MnO_2) pulvérisée
- zéolite naturel (glauconite) ou sable vert
- charbon de bois sulfoné

recouverts d'oxydes de manganèse par procédés alternés au $MnSO_4$ et au $KMnO_4$

Ces filtres fonctionnent comme échangeurs d'électrons : MnO_2 oxyde Fe(II) et Mn(II) (précipités et retenus dans la masse filtrante) et est lui-même réduit à l'état de sesquioxyde Mn_2O_3.

La boue d'hydroxyde de fer peut également jouer un rôle catalytique.

6. PRÉ-SÉPARATION

Si l'eau est peu chargée, on réalise une filtration directe. Dans le cas contraire, la "pré-séparation" a pour but d'éviter un colmatage trop rapide des filtres, c'est-à-dire des cycles courts et des crevaisons brutales qui nécessiteraient une consommation élevée en eau de lavage.

6.1 La décantation

La technique de décantation consiste parfois à faire circuler l'eau floculée à travers un lit de boues, pulsé ou non, éventuellement surmonté par une garniture de plaques partiellement immergées dans le lit.

Il en existe différents types (rectangulaires, circulaires) ou plus perfectionnés, décantateurs lamellaires qui permettent de multiplier dans un même équipement les surfaces de séparation eau/boue.

On estime généralement que la décantation, qui est l'étape de clarification la plus couramment employée, est nécessaire pour des teneurs initiales en fer supérieures à 10 mg/l.

6.2 La flottation

La flottation consiste en l'adsorption de microbulles d'air de 40 à 50 µm de diamètre sur les particules. Les flocs ainsi lestés d'air remontent à la surface du bassin et peuvent être retirés par raclage mécanique.

Ces deux techniques, *notamment* la *flottation*, *sont en réalité rarement* utilisées en matière d'eau minérale.

6.3 La filtration

Cette étape suit l'étape éventuelle de décantation ou de flottation ; dans ce cas elle fixe les matières floculées qui n'ont pas été retenues.

L'efficacité de l'élimination du fer et du manganèse dépend de la technique de filtration, du type de répartition de la masse filtrante (homogène ou en bicouche) du matériau lui même qui se caractérise par la porosité entre les grains, l'aire spécifique, les propriétés électrocinétiques et de sorption de la surface des grains eux mêmes.

a) Matériaux traditionnels

- Le sable

Les filtres à couche de sable homogène conviennent dans la majorité des cas, à condition de bien choisir la vitesse, la granulométrie et la hauteur de la couche.

Ce type de filtre demande une faible charge hydraulique.

Le sable est constitué par du sable quartzeux (matériau le plus souvent utilisé).

- L'anthracite peut également être utilisée.

- Des matériaux à forte surface spécifique : pouzzolane, schistes expansés.

- Certains de ces matériaux peuvent être utilisés en combinaison dans les filtres multicouche.

b) Les matériaux manganisés

- Rôle catalytique de MnO_2.

Comme on l'a vu dans le paragraphe sur la catalyse, MnO_2 a le rôle d'échangeur d'électron. Il oxyde Fe(II) et Mn(II) qui précipitent et sont retenus par la masse filtrante et est lui-même réduit à l'état de sesquioxyde Mn_2O_3 selon par exemple :

$$2\,Fe^{2+} + 2\,MnO_2 + H_2O \triangle 2\,Fe^{3+} + Mn_2O_3 + 2OH^-$$

Pour enrober les grains du filtre d'oxydes de manganèse, on fait passer une solution de $KMnO_4$ et des sels de manganèse. Par la suite, la régénération du MnO_2 épuisé se fait par le passage d'une solution de MnO_4^- ou ClO^- qui réoxyde Mn_2O_3.

Ce type de filtre n'est utilisable que pour des eaux, sans matière organique, à faibles teneurs en Fe et Mn.

- Sables manganisés.

On utilise du sable ordinaire ou plus couramment des sables verts ou zéolites.

. Zéolites ou sables verts : il s'agit d'une combinaison de glauconite du New Jersey, de $MnSO_4$ et de K_2SO_4 qui aboutit à la formation d'un lit filtrant de grains de sable contenant des oxydes de manganèse.

- Nodules polymétalliques.

L'utilisation de ces nodules repose sur deux observations :

1. Leur dimension varie du cm à la dizaine de cm et ils sont formés de couches successives d'oxyde de manganèse et de fer dont on connaît les propriétés catalytiques.

2. Ce matériau possède une structure poreuse très divisée, favorable aux réactions de surface.

   Il n'existe pas à notre connaissance d'exploitation d'eau minérale utilisant de tels nodules polymétalliques.

Répartition de la masse filtrante

Dans le cas le plus général, le sens de filtration est descendant. Selon le type de lavage adopté, on distingue trois types de filtration qui correspondent à des choix de granulométries différentes :

. La filtration sur couche de matériau homogène.

  Le lavage de ce matériau est effectué à l'air et à l'eau, sans expansion hydraulique lors de la phase finale de rinçage. Il en résulte une homogénéité parfaite de la couche de filtration ; la granulométrie du matériau filtrant est la même à la base et au sommet de la couche filtrante. Au cours du cycle de filtration, le front de filtration s'établit et progresse régulièrement, ce qui facilite la maîtrise du cycle de filtration.

. Filtration sur couche de matériau hétérogène.

Lorsque le lavage s'effectue avec seulement de l'eau, ou comporte en phase finale un rinçage avec mise en expansion hydraulique du matériau, on observe un classement du matériau filtrant dont la couche n'est plus homogène. Les grains les plus gros sont à la base de filtre, alors que les grains les plus fins sont au sommet. Au cours du cycle de filtration, le matériau fin reçoit l'eau à épurer contenant toutes les matières à retenir, alors que le matériau le plus gros reçoit une eau plus propre ; la maîtrise du cycle de filtration est alors plus difficile, les cycles sont plus courts, étant donné l'effet de tamisage que le matériau fin réalise à la surface du filtre.

Filtration à plusieurs couches filtrantes.

Les observations précédentes ont conduit à mettre en œuvre une filtration comportant deux couches filtrantes (filtration bicouche), voire plusieurs couches filtrantes (filtration multicouche).

Pour éviter l'effet de tamisage provoqué par les grains de sable les plus fins dans une filtration sur couche hétérogène et favoriser la pénétration des impuretés dans toute la hauteur du filtre, on remplace une partie du sable fin par une couche de matériau plus léger et dont la taille effective est supérieure à celle du sable. Le choix de la granulométrie de chacune des deux couches doit être faite avec soin ; il est lié à la possibilité de les mettre en expansion de façon semblable avec le même débit d'eau de lavage, afin de pouvoir les reclasser à la fin de chaque lavage, avant remise en filtration.

Cette disposition permet d'obtenir une répartition des MES retenues ; les plus grossières sont retenues dans la couche supérieure de grosse granulométrie, alors que la couche inférieure, de faible granulométrie, sert de finition et de sécurité.

On peut également réaliser une filtration sur trois ou plusieurs couches, qui améliore la pénétration en profondeur des impuretés, mais au prix de diverses sujétions de choix de matériaux et de technologie de lavage.

Lavage du milieu filtrant

Le lavage est une opération très importante ; lorsqu'il est insuffisant, il entraîne le colmatage permanent de certaines zones, ne laissant à l'eau qu'un passage réduit ; la perte de charge s'accroît alors plus vite, la filtration devient localement plus rapide et moins efficace.

Pour laver le matériau filtrant, on le soumet à un courant d'eau, circulant de bas en haut, destiné à détacher les impuretés et à les entraîner ensuite dans une goulotte d'évacuation. Le matériau filtrant doit être simultanément agité dans le courant d'eau.

7. LE TRAITEMENT BIOLOGIQUE

Les bactéries du fer et du manganèse sont ubiquistes et constituent entre autre une partie de la microflore normale des eaux souterraines.

La présence de fer et de manganèse, associée à des conditions favorables (pH, eH, O_2 ...) au développement de bactéries du fer et du manganèse, permet la multiplication de ces bactéries qui catalysent l'oxydation de ces deux métaux.

Mode d'action

- Oxydation.

Les bactéries du fer et du manganèse catalysent par production d'enzymes spécifiques des réactions exothermiques d'oxydation qui alimentent leur métabolisme grâce à l'énergie libérée.

$$2\,FeO + 1/2\,O_2 + 3H_2O \triangle 2\,\underline{Fe\,(0H)_3} + 1057 \text{ joules}$$

$$2MnO + O_2 + 2H_2O \triangle 2M\underline{nO(OH)_2} + 167 \text{ joules}$$

L'oxydation du fer par voie biologique est plus facile car elle libère 6 fois plus d'énergie que celle du manganèse.

- Catalyse.

Les mécanismes possibles de la catalyse sont :

. absorption de Fe et/ou Mn sur la surface externe de cellules bactériennes ;
. oxydation bactérienne de Fe et/ou Mn absorbé ;
. oxydation catalytique de Fe^{++} ou Mn^{++} en présence de MnO^2.

- Mise en œuvre.

En matière d'eaux potables, l'élimination biologique de Fe et Mn s'effectue en général par filtration, le matériau filtrant servant de support aux bactéries et favorisant la formation d'une membrane biologique active à grande surface d'échange.

A titre d'exemple, la déferrisation biologique permet, entre deux lavages de retenir jusqu'à 5 fois plus de fer qu'un procédé d'aération classique.

Le traitement biologique du manganèse est plus difficile et demande en particulier des délais d'ensemencement beaucoup plus longs (de l'ordre du mois).

C. ENQUÊTE DE TERRAIN

- Une enquête a été réalisée auprès d'un certain nombre d'exploitations ayant eu à affronter des difficultés particulières dans ce domaine.

- Il en est ressorti que, pour ce qui concerne les techniques d'élimination du fer et du manganèse, les eaux minérales, compte tenu des contraintes réglementaires imposées, constituent plus une somme de cas particuliers qu'un groupe d'eaux auquel on peut appliquer des principes généraux.

- Les problèmes rencontrés sont rendus encore plus complexes en cas de présence, en sus du fer et du manganèse, d'ammonium ou d'arsenic.

D. SYNTHÈSE DES POINTS DE VUE ET DES PROBLÈMES RENCONTRES

8. LES ESPÈCES CHIMIQUES

8.1 Le fer

Dans les conditions imposées par la réglementation spécifique aux eaux minérales, le fer dissous est facilement éliminé par aération, par ozonation, par voie biologique, ou par catalyse (sables manganifères ou boues d'hydroxyde de fer).

8.2 Le manganèse

Il peut en principe être éliminé par aération mais l'opération est malcommode (cinétique lente donc installations volumineuses).

L'oxydation par l'ozone est efficace, son élimination par voie biologique également de même que par voie catalytique.

8.3 L'ammonium

Bien que ne faisant pas partie initialement des objectifs de l'étude, l'ammonium a du être intégré dans cette réflexion du fait de sa présence fréquente dans les eaux captées par forage profond (en milieu réducteur), du fait des problèmes particuliers qu'il pose aux exploitants et du fait des perturbations qu'il engendre dans la mise au point des process de traitement du fer et du manganèse.

Le schéma de la figure 1 résume le cycle de l'azote ; en transposant ce schéma aux eaux souterraines :

- Les eaux captées en milieu aéré, peu profond auront tendance à contenir de l'azote sous forme oxydée (soit nitrates, soit nitrites, soit les deux).

- Les eaux captées par forage profond en milieu réducteur, contiendront, le cas échéant, de l'ammonium NH_4^+ dont la présence va générer un certain nombre de difficultés ; si on ne l'élimine pas, il y aura risque d'apparition de nitrites dans l'eau une fois conditionnée (surtout pour les eaux plates du fait de l'oxygénation inévitable dans la bouteille, liée au procédé de conditionnement). De plus, sa présence risque de perturber le bon fonctionnement des procédés mis en œuvre pour l'élimination du fer et du manganèse.

Les procédés d'élimination de l'ammonium sont peu nombreux :

- la chloration (les autres oxydants notamment l'ozone sont inefficaces) ;
- l'élimination biologique : nitrification (passage de NH_4^+ en NO_2^+) par des germes du genre nitrosomonas et nitratation (passage de $N0_2^-$ en NO_3^-) par des germes du genre nitrobacter.

Néanmoins, ces germes étant aérobies, ils ne seront pas présents naturellement dans l'eau profonde ; il faut donc recourir à des ensemencements artificiels soit par des cultures de ces germes, soit par des boues de traitement activées.

On voit donc que la présence éventuelle d'ammonium, dans une eau minérale naturelle va être source de difficultés, car aucune des techniques connue d'élimination n'est réellement envisageable dans le cadre de la réglementation actuelle.

8.4 L'arsenic

L'arsenic est également souvent présent en concentrations notables dans les eaux minérales captées en milieu volcanique, volcanosédimentaire ou cristallin.

Les expériences rapportées font état de deux constatations :

- En présence de fer, l'élimination de l'arsenic est aisément réalisée par aération : l'arsenic coprécipite avec le fer.

- En l'absence de fer, son élimination est plus difficile ; néanmoins des expérimentations récentes montrent que la filtration sur sable manganifère donne de bons résultats.

9. LES PROCÉDÉS UTILISÉS

9.1 L'aération (saturation à l'air ou à l'oxygène)

Le procédé permet l'élimination du fer sans difficulté particulière ; la vitesse d'oxydation du fer permet le dimensionnement d'installations de taille raisonnable.

Généralement après quelques heures de fonctionnement de la filtration, on observe la mise en place spontanée d'un feutrage des filtres à sables qui contribue à accélérer considérablement la déferrisation (effet catalytique de la présence d'hydroxyde de fer ou action biologique des ferrobactéries).

L'oxydation du manganèse étant plus difficile, elle est le plus souvent incomplète sauf à mettre en œuvre des temps de contact prohibitifs ; d'autre part il faut le plus souvent procéder par étapes : première oxydation et filtration pour le fer puis seconde oxydation et filtration pour le manganèse. Les remarques concernant l'effet d'accélération du feutrage du filtre valent également pour le manganèse.

En cas de présence simultanée de Fe^{++} et NH_4^+, ou Fe^{++}, NH_4^+ et Mn^{++}, l'appoint biologique au niveau des filtrations permet théoriquement de procéder à l'élimination de ces constituants, mais outre la nécessité de procéder par étapes (Fe^{++} puis NH_4^+ puis Mn^{++}), la gestion de la qualité des eaux en sortie devient délicate.

Par ailleurs, si la mise en place de cet appoint biologique dans le processus d'aération en accélère l'efficacité, elle impose également des contraintes en retour : à la fin de chaque cycle de filtration, nécessité de respecter un délai de "maturation" des filtres après lavage, avant que le process ne retrouve son efficacité. Ces délais, courts en présence de fer seul, sont plus longs en présence de NH_4^+ ou de Mn^{++}. Enfin la mise en place de cet appoint si elle est bien commode dans des conditions de fonctionnement normales, a sa contrepartie en cas de pollution : la désinfection nécessaire des filtres, implique d'attendre ensuite ou de provoquer leur réensemencement et des délais de maturation pouvant atteindre plusieurs semaines, en cas de présence d'ammonium avant d'observer la restauration de la transformation biologique de l'ammonium en nitrates sans production de nitrites dans l'eau de sortie.

NB : Au cours de nos entretiens, il nous a été rapporté un exemple d'élimination du fer et du manganèse, sans injection d'air : l'eau brute partiellement dégazée passe par une cuve ou elle reste en contact pendant environ 1 h avec la boue de décantation de l'installation, fer et manganèse précipiteraient par action catalytique de $Fe(OH)_3$.

Enfin, en cas de présence d'arsenic, l'aération permet également son élimination, si du fer dissous est présent pour entraîner la coprécipitation de l'arsenic.

9.2 L'ozonation

La mise en place de traitement à l'air ozoné est particulièrement efficace pour l'élimination de teneurs importantes en manganèse, en permettant de réduire les temps de contact à quelques minutes.

Elle impose néanmoins beaucoup de contraintes :

- risque non négligeable de modifier de façon importante la composition chimique de l'eau avec parfois apparition de sous produits indésirables (bromates...) ;
- modification inévitable du microbisme naturel de l'eau minérale ;
- élimination préalable obligatoire du fer et éventuellement de l'ammonium et stabilité de leur concentration résiduelle dans l'eau avant ozonation ;
- injection de 4 à 5 fois la teneur théorique stœchiométrique (0,87 mg d'O_3 par mg de Mn) ;
- mise en place de dispositifs de purge de l'excès d'ozone et de suivi de l'ozone résiduel dans l'eau traitée ;
- contrôle de l'excès d'ozone dans l'air rejeté à l'atmosphère.

D'une façon générale, cette technique, du fait de l'oxydant utilisé, implique une mise au point minutieuse, des conditions de fonctionnement aussi régulières que possible et une stabilisation parfaite de la qualité de l'eau avant traitement. Enfin, l'effet sur la flore banale de l'eau n'est jamais abordé.

9.3 Procédés biologiques

La constatation des effets spectaculaires de la mise en place spontanée de processus de déferrisation biologique a amené certains constructeurs à proposer, pour le traitement des eaux minérales, des installations biologiques dérivées de celles qui existent en matière d'eau potable.

Les avantages théoriques de ce genre d'installations sont appréciables : compacité remarquable et possibilité théorique d'éliminer le fer, l'ammonium et le manganèse.

Trois installations pilotes ont ainsi été mises en place sur des exploitations d'eau gazeuse. Dans aucun des cas l'expérience n'a été concluante.

Sur l'un des sites, un système de filtration à hydroanthracite a été ensemencé. L'installation a été démarrée à l'oxygène pur et fonctionnait de façon satisfaisante jusqu'à l'apparition d'un processus de réduction bactérienne des sulfates dans le forage et production d'H_2S.

Il a donc fallu arrêter l'installation et tout désinfecter pour éliminer ce problème.

Après cette désinfection, la remise en route de l'installation biologique n'a jamais pu être obtenue ; l'exploitant a donc du remettre en place une installation de déferrisation classique à l'air, en abandonnant finalement l'idée d'éliminer le manganèse.

Des tentatives analogues ont été réalisées sur deux autres sites, en utilisant de l'argile expansée ou de la biolite comme support, mais ont du être abandonnées après quelques semaines de fonctionnement pour les raisons suivantes :

- la boue d'ensemencement a entraîné une multiplication de problèmes de qualité microbiologiques en sortie de traitement ;

- la nitrification complète de l'ammonium en nitrate n'ayant pas pu être atteinte, il y avait apparition de nitrites dans l'eau traitée.

Les exploitants dans ces cas également en sont revenus à une déferrisation classique par aération et filtration sur sable siliceux, avec même nettoyage et désinfection des installations tous les deux mois pour éviter que le "complément biologique" ne s'installe ; l'eau gazeuse est embouteillée avec ses concentrations en Mn^{++} et NH_4^+ originelles.

Ces deux expériences amènent à conclure qu'en matière d'eau minérale, la mise en place de procédés "volontaristes" de traitement biologique présente apparemment trop de risques :

- la compacité et la conception des installations ne permet pas, en cas de dysfonctionnement, le retour aux procédés classiques d'oxydation ;
- les risques de qualité liés à la boue d'ensemencement sont importants ;
- ces installations sont trop délicates et trop vulnérables pour offrir toute garantie.

Il est de loin préférable de concevoir une installation d'oxydation classique, quitte à ce qu'au bout d'un certain temps de fonctionnement, la mise en place (spontanée ou non) d'un complément biologique en améliorant le rendement de l'installation, la rende parfois apparemment surdimensionnée. Néanmoins cela représente la solution la plus sécurisante ; en cas de difficulté de fonctionnement du complément biologique, la continuité de l'exploitation peut être maintenue en remettant en fonctionnement l'ensemble de l'installation initiale.

NB : Il convient de signaler qu'apparemment, en milieu anaérobie (cas des eaux gazeuses ?) la bactérie autotrophe *Gallionella ferruginea*, l'une des deux espèces à la base de la déferrisation biologique, serait capable d'utiliser l'oxygène des nitrates, en les réduisant en nitrites qui seraient à leur tour réduits par l'ion ferreux Fe^{2+} (s'il est présent) pour former de l'azote gazeux et du fer trivalent qui précipite.

Ce phénomène pourrait contribuer à expliquer l'apparition passagère de nitrites dans certaines eaux gazeuses embouteillées, notamment après des phases d'arrêt des installations de déferrisation classique.

Une autre observation rapporte dans certaines eaux gazeuses l'apparition de nitrites en été, sous l'influence des bactéries du fer présentes dans l'eau. Aucune explication n'est donnée.

9.4 Les matériaux manganifères

On dispose maintenant des résultats d'une expérimentation extrêmement intéressante réalisée et publiée par le groupe Danone sur une eau minérale gazeuse.

a) Une série d'essais en laboratoire a permis de tester différents sables manganifères. Plusieurs conclusions principales en ont été tirées :

- faisabilité de l'élimination catalytique du fer et du manganèse ;
- variabilité des performances des ces sables en fonction de leur composition minéralogique, certains allant jusqu'à provoquer un abaissement excessif de la minéralisation de l'eau ;
- importance du contrôle de la constance de qualité minéralogique du sable utilisé ; dans une même carrière, sa composition peut être variable d'un endroit à l'autre, affectant ainsi son rendement.

2) Des essais pilotes ont ensuite été réalisés avec deux sables différents sélectionnés pour leurs performances en termes d'élimination du fer et du manganèse sans affecter les caractéristiques principales de l'eau gazeuse utilisée et ont permis de définir les conditions optimales de fonctionnement :
   - temps de contact 12' ;
   - optimisation de la vitesse de filtration ;
   - stérilisation thermique du lit filtrant permettant de maintenir un équilibre de la flore microbienne identique à l'entrée et en sortie ;
   - optimisation de la régénération des filtres :
     . phase de détassage du lit filtrant
     . décapage du filtre à l'acide nitrique
     . régénération au $KMnO_4$
     . drainage et rinçage à l'eau de ville puis à l'eau minérale

3) Depuis avril 1997 cette installation fonctionne en vraie grandeur selon le schéma de principe suivant :

- décarbonatation et déferrisation préalable de l'eau par voie classique (aération),
- démanganisation : trois filtres à sable manganifère en série (volume 100 l de sable), dont deux sont en fonctionnement et le 3ème en régénération ; permutation toutes les 48 h.

NB : (Les rejets d'acide de régénération sont collectés par une entreprise spécialisée qui les recycle dans la production d'engrais).

Les caractéristiques de l'eau avant et après traitement sont les suivantes (tableaux 2 et 3).

Tableau 2

	Eau brute (mg/l)	Eaux traitée (mg/l)
Minéralisation totale	1100	1100
CO_2 libre	1800	1800
Fer	5,5	< 0,05
Manganèse	0,85	< 0,3

Tableau 3

Caractéristiques	pH	Conductivité µS/cm	$[CO_2]$ mg/l	$[HCO_3^-]$ mg/l	$[Ca^{2+}]$ mg/l	$[Mg^{2+}]$ mg/l	$[Cl^-]$ mg/l
Avant filtration	5,9	1500	2270	1110	283	21,0	18,0
Après filtration	5,9	1490	2280	1110	283	21,0	18,0

Une expérimentation a été réalisée dans les mêmes conditions sur une eau plate contenant de l'arsenic, en l'absence de fer dissous ; elle met en œuvre une procédure de régénération des sables en fin de cycle plus complexe, faisant appel à une injection de soude, un rinçage à l'eau minérale traitée et un nouveau lavage à l'acide avant rinçage final à l'eau minérale traitée.

Les résultats obtenus sont les suivants (tableaux 4 et 5).

Tableau 4

	Eau brute	Eau traitée
Minéralisation totale	120 mg/l	120 mg/l
Arsenic	17µg/l	<5 µg/l

Tableau 5

Capacité spécifique en mg As fixé/l sable	6,8
Volume traité en vol. de lits (2 x 200 = 400 l)	450
Durée de cycle en jours	7,5

Il convient de noter également que lors de la mise en œuvre de ce procédé de l'eau gazeuse on a constaté un abaissement de 70 à 80 % de la teneur de l'eau en U235.

Enfin cette technique prometteuse est également en cours de test par le groupe Nestlé.

10. LES EAUX MINÉRALES PLATES ET LES EAUX MINÉRALES GAZEUSES

Les problèmes posés par l'existence de fer, de manganèse, d'ammonium ou d'arsenic et la nécessité éventuelle de les éliminer, sont très différents suivant que l'on a à faire à une eau minérale plate (ou à une eau de source) ou à une eau minérale gazeuse.

10.1 Les eaux minérales plates

Suivant leur profondeur de captage, les eaux minérales plates peuvent être issues d'un milieu oxydant ou réducteur.

La présence de Fe^{++}, Mn^{++}, NH_4^+ dissous ne sera donc pas systématique.

Par contre, si ces éléments sont présents, ils devront obligatoirement être éliminés, car l'aération liée au process de conditionnement de l'eau, va inévitablement engendrer des risques d'oxydation de ces espèces dans la bouteille.

Les techniques d'élimination de ces espèces ne seront a priori pas différentes de celles utilisées pour les eaux gazeuses, si ce n'est que la gestion des risques microbiologiques, qui est un problème constant pour les eaux minérales, devra être encore beaucoup plus rigoureuse que pour les eaux gazeuses.

La présence d'ammonium pose toutefois des problèmes extrêmement difficile à résoudre, au point que selon certains industriels de la profession, l'absence d'ammonium est un des critères déterminants dans la recherche d'eau plate de qualité embouteillable.

10.2 Les eaux minérales gazeuses

Les eaux minérales gazeuses étant généralement saturées en CO_2, la présence de Fe^{++}, Mn^{++} et NH_4^+ sera beaucoup plus fréquente, à des teneurs pouvant être relativement importantes, mais les risques de problèmes induits au niveau de la bouteille, sont en général plus faciles à maîtriser, du fait de la recarbonatation de l'eau après traitement éventuel.

Sur de nombreux sites, on se contente de déferriser en laissant Mn^{++} et NH_4^+ dissous.

Par contre, si Mn^{++} est présent à des concentrations élevées, des procédés spécifiques doivent être mis en œuvre (sables manganifères ou ozonation) après avoir éliminé le fer et éventuellement l'ammonium.

A noter que la saturation en gaz carbonique de l'eau dans la bouteille ne permet pas non plus d'exclure tout risque d'apparition ultérieure de nitrites.

11. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La généralisation du recours au forage profond pour recapter les eaux minérales en s'affranchissant notamment des problèmes environnementaux, entraîne de plus en plus fréquemment la découverte d'eaux issues d'un milieu profond, réducteur et donc pouvant contenir du fer, du manganèse à l'état réduit, mais également de l'ammonium, que l'on va fréquemment devoir éliminer, soit sur la base de critères organoleptiques, soit pour se conformer à des normes de qualité chimique.

Ces problèmes ne sont pas nouveaux en particulier dans le domaine des eaux potables, pour lesquels de nombreux procédés d'élimination de ces espèces ont été mis au point.

La réglementation spécifique des eaux minérales, en interdisant le recours à des moyens chimiques de traitement et obligeant au maintien de leur qualité microbiologique de ces eaux sans recours à des traitements de désinfection de l'eau, restreint considérablement le champ d'application de ces méthodes générales, en obligeant d'une façon quasi systématique à procéder au préalable à des essais sur installations pilotes avant de dimensionner les process de traitement en vraie grandeur.

L'enquête réalisée a permis par ailleurs de montrer les points suivants :

- en matière de traitement d'élimination de Fe^{++}, Mn^{++}, NH_4^+, chaque eau doit apparemment être considérée comme un cas particulier potentiel ;

- l'élimination du fer est généralement bien maîtrisée et ne pose pas de difficulté particulière ;

- l'élimination du manganèse peut parfois se faire par aération classique, cependant on est le plus souvent obligé de recourir à une ozonation, en sachant que d'une part les prescriptions ébauchées au niveau du projet de directive européenne semblent difficiles à respecter et que d'autre part l'impact sur la flore banale, bien qu'inévitable, est généralement passé sous silence.

A ces deux titres la catalyse de la précipitation par utilisation de sables manganifères semble beaucoup plus respectueuse de l'eau et de l'esprit de la réglementation.

Quant aux procédés d'élimination biologique de ces espèces, les appréciations portées doivent être beaucoup plus nuancées ; quand la participation biologique se met spontanément en place au niveau d'un process d'aération filtration classique, elle peut être bienvenue, en améliorant les rendements de l'installation, mais peut induire des difficultés particulières ; outre une obligation d'être plus rigoureux en termes de gestion du risque microbien, elle n'est pas non plus exempte de risques en cas de présence d'ammonium. Les procédés de traitement biologique "volontariste" (mise en place d'une installation conçue à cet effet et activation par ensemencement bactérien) semblent trop risqués car trop difficilement maîtrisables en l'absence de possibilité de recours à des traitements chimiques d'appoint pour garantir la qualité de l'eau.

FIGURE

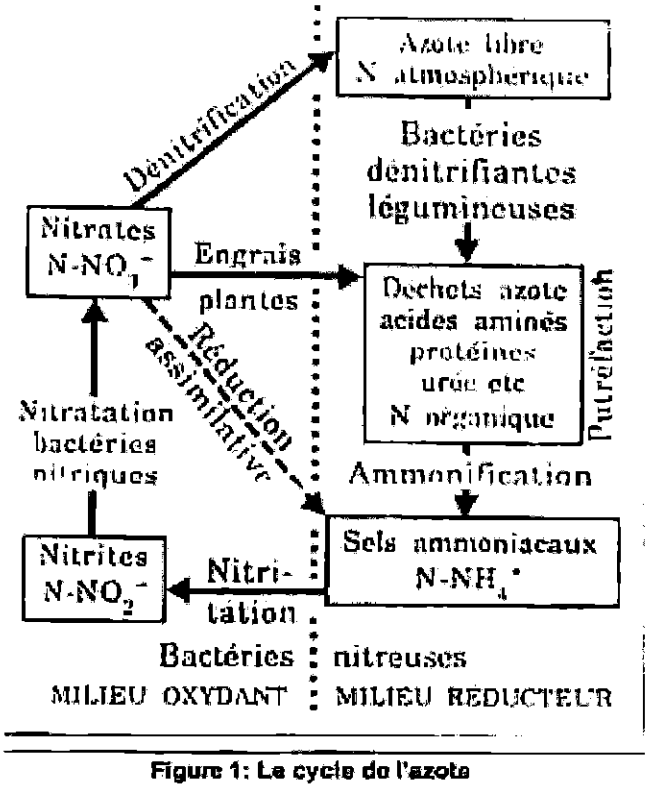


Figure 1: Le cycle de l'azote

Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie

Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

Eau Minérale et Radioactivité

Note technique n° 15

Juillet 2000

DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 1

2. RAPPEL DES NOTIONS SUR LA RADIOACTIVITE 1

2.1 Caractérisation de la radioactivité 2
2.2 Effets des rayonnements sur la matière 3
2.3 Radioactivité dans la nature 4
2.4 Exposition des organismes vivants aux rayonnements radioactifs 5
2.5 Radioactivité des eaux minérales 7

3. REGLEMENTATION ET TEXTES DE REFERENCE 9

3.1 Réglementation applicable aux eaux minérales 9
3.2 Réglementation applicable aux eaux destinées à la consommation humaine 11
3.3 Recommandations OMS 11

4. CONCLUSION 12

BIBLIOGRAPHIE 13

Tableaux :

1. Termes et unités radiologiques 14
2. Liste des radionucléides naturels 15

Annexes :

1. Exemples de calcul de l'activité radioactive et des doses absorbées 16
2. Famille d'Uranium 235 19
3. Famille d'Uranium 238 20
4. Famille de Thorium 232 21
5. Extrait des recommandation de l'OMS 22

RESUME

Les analyses de radioactivité font partie des éléments constitutifs des dossiers de demande d'autorisation des eaux minérales.

La présente note technique a pour objet de permettre aux services en charge de l'instruction de ces dossiers de disposer d'informations utiles pour une lecture éclairée des résultats d'analyse de la radioactivité.

Les textes de référence, actuellement disponibles au niveau mondial, sont les recommandations de l'OMS en matière d'eau de boisson (Directives de qualité pour l'eau de boisson 1994).

Au niveau européen les limites admissibles en terme de radioactivité pour les eaux destinées à la consommation humaine sont définies par la directive n° 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998.

Au niveau français, la transcription en droit national de la directive européenne n° 98/83 est en cours d'élaboration.

On notera que les eaux minérales n'entrent pas dans le champ d'application de ces textes. Cependant, en l'absence de texte spécifique, les recommandations de l'OMS peuvent servir de référence, notamment dans le domaine des eaux conditionnées.

1. INTRODUCTION

Si émettre un avis sur la radioactivité d'une eau minérale relève de l'aspect sanitaire (domaine de spécialistes), il n'en demeure pas moins que les bulletins d'analyse de radioactivité font partie des dossiers de demande d'autorisation d'exploiter une eau minérale dont les DRIRE assurent l'instruction.

La présente note technique a pour objet de présenter les notions essentielles de la radioactivité de *façon à permettre au lecteur* de disposer d'éléments d'information pour comprendre les résultats d'analyses.

Cette note a été établie avec l'assistance de l'OPRI ([1]) rattaché au ministère chargé de la santé comme laboratoire officiel pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement et les denrées destinées à la consommation. La liste des laboratoires ayant obtenu le certificat de qualification pour la mesure de certains radionucléides a été établie par le ministère chargé de la santé (arrêté du 22 mai 1998).

NOTA : *Les éléments pris en compte quant aux aspects réglementaires ne concernent pas la protection des travailleurs contre les rayonnements ionisants dans les usines ou établissements thermaux concernés.*

2. RAPPEL DES NOTIONS SUR LA RADIOACTIVITÉ

La radioactivité est la transformation aléatoire spontanée d'un noyau atomique au cours de laquelle ce dernier émet un rayonnement. Il existe plusieurs types de transformations et de rayonnements. Les plus répandus dans la nature sont les rayonnements α, β et γ.

- Le rayonnement α est la conséquence de la désintégration (partition) d'un noyau atomique avec expulsion (émission) d'un noyau d'hélium (particule α) comprenant deux protons (charges électriques élémentaires positives) et deux neutrons. Les particules α sont lourdes et généralement très énergétiques (entre 4 et 10 MeV ; 1eV = $1{,}6.10^{-19}$ Joule). En traversant la matière (air, eau, solide, tissu vivant) ces particules restituent leur énergie en provoquant une ionisation. Leur trajet dans la matière est relativement court : quelques centimètres dans l'air, quelques micromètres dans l'eau. Les particules α sont arrêtées par une très mince feuille de papier.

- Le rayonnement β négatif est une émission d'un électron (particule β négative) à l'occasion de la transformation d'un neutron en proton (il existe également des émissions de particules β positives, appelées "positons" ou encore "électrons positifs", quand des protons se transforment en neutrons). Les particules β négatives sont beaucoup plus légères et moins énergétiques (entre 0,02 à 3 MeV) que les particules α. Elles restituent leur énergie en provoquant une ionisation, sur plusieurs mètres dans l'air ou plusieurs millimètres dans l'eau ; elles sont arrêtées par une plaque de verre ou une feuille d'aluminium.

[1] OPRI = Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants

- Le rayonnement γ est une émission de photons analogues à ceux de la lumière (rayonnement électromagnétique) qui se produit presque toujours au moment d'une désintégration α ou β : les noyaux résultant de ces désintégrations se trouvent dans un état "excité" et ils se "désexcitent" (*en revenant à un état fondamental*) *par émission de rayons électromagnétiques* (longueur d'onde des rayons γ : 10^{-10} à 10^{-12} m ; lumière visible : environ 10^{-6} m ; rayons X : 10^{-9} à 10^{-10} m) ; les rayons γ ont une énergie environ 10^5 fois plus forte que la lumière visible et sont très pénétrants ; le rayonnement γ ne peut être atténué ou arrêté que par des épaisseurs significatives de plomb ou de béton.

2.1 CARACTERISATION DE LA RADIOACTIVITE

Activité d'un élément radioactif

L'activité A d'une substance radioactive (radioélément ou isotope radioactif) est le nombre de désintégrations par unité de temps. Elle est exprimée en "becquerel" (Bq), *un Bq correspondant à* une désintégration par seconde. Elle dépend :

- de la quantité de substance radioactive prise en considération (ou plus exactement le nombre N d'atomes radioactifs pris en considération à l'instant donné) ;

- de la constante radioactive λ, cette constante étant une caractéristique de chaque élément radioactif :

$$A = \lambda.N$$

L'activité A d'une substance radioactive décroît exponentiellement suivant la loi de décroissance :

$$A = A_0.e^{-\lambda t} \text{ (A_0 étant l'activité à l'instant t_0)}$$

On peut écrire aussi $N = N_0.e^{-\lambda t}$ (N_0 étant le nombre d'atomes radioactifs à l'instant t_0 et N, le nombre d'atomes radioactifs non désintégrés, après un temps t).

Période d'un radioélément T

La période T d'un radioélément est le temps après lequel la moitié des atomes initialement présents ont disparu par désintégration.

Après un temps T, N n'est plus que $\frac{No}{2}$

On en déduit la relation :

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

La période T, comme la constante radioactive λ, est une caractéristique de chaque élément radioactif.

Les périodes radioactives des éléments radioactifs naturels ont une gamme très étendue. Elles s'échelonnent entre quelques milliards d'années et une fraction de seconde. Par exemple :

- uranium 238 ($^{238}_{92}U$), T = $4{,}5.10^{9}$ années
- radium 226 ($^{226}_{88}Ra$), T = 1 617 années
- radon 222 ($^{222}_{83}Rn$), T = 3,8 jours
- polonium 214 ($^{214}_{84}Po$), T = $1{,}6.10^{-4}$ seconde

Énergie des particules et des photons γ

Les particules α et β émises à l'occasion des désintégrations des noyaux atomiques n'ont pas la même énergie. Celle-ci, exprimée en MeV (1 MeV = $1{,}6.10^{-13}$ J) dépend du noyau qui se désintègre. Les graphiques joints en annexe donnent les énergies des particules émises par les radionucléides des familles de l'uranium 238 ($^{238}_{92}U$), du thorium 232 ($^{232}_{90}Th$) et de l'uranium 235 ($^{235}_{92}U$).

L'énergie des photons γ émis à l'occasion des désintégrations α et β des radionucléides naturels est généralement très faible comparativement à l'énergie de ces particules.

2.2 EFFETS DES RAYONNEMENTS SUR LA MATIERE

En traversant la matière, les rayonnements lui transmettent l'énergie dont ils sont porteurs et provoquent généralement une ionisation des atomes rencontrés. L'énergie transmise à l'unité de masse de matière est la "dose absorbée" dont l'unité de mesure est le Gray (Gy) ; le Gray étant l'énergie de 1 Joule dissipée dans 1 kg de matière : 1 Gy = 1 J/kg. Une autre unité utilisée est le rad (1rd = 10^{-2} Gy).

Si l'énergie des rayonnements est dissipée dans des tissus vivants, à forte dose, ces tissus peuvent être détruits par brûlures et entraîner la mort des organismes. A faible dose, les effets sont généralement imperceptibles, mais des cellules vivantes peuvent être endommagées et l'ADN peut subir des lésions. La nocivité des rayonnements ne dépend pas seulement de la quantité d'énergie dissipée par les rayonnements mais aussi des organes exposés et de la nature des rayonnements, les α étant beaucoup plus nocifs (plus ionisants) que les β et γ.

Ainsi, pour tenir compte des effets dommageables, on applique aux doses absorbées par les tissus vivants un coefficient appelé "facteur de qualité" ou "facteur de pondération radiologique" FQ, dépendant de la nature des rayonnements. Pour les rayonnements β et γ, le facteur de qualité FQ = 1 ; pour les rayons α, FQ = 20. Pour ne pas confondre les doses absorbées par les substances inertes (exprimées en Gray) avec les doses absorbées par les tissus vivants, auxquelles a été appliqué le facteur de qualité FQ, dans le dernier cas, on parle « d'équivalent de dose absorbée » et l'unité de mesure est le sievert (Sv).

Les différentes unités utilisées sont regroupées dans le tableau 1 ci-après (page 14). L'annexe 1 (page 16) comporte quelques exemples de calcul des activités et des doses absorbées.

2.3 RADIOACTIVITE DANS LA NATURE

La radioactivité de l'environnement ambiant est due essentiellement au rayonnement cosmique et aux radionucléides naturels de très longue période (de l'ordre de l'âge de la terre sinon ils auraient déjà disparu). Parmi ces derniers, les plus connus sont les deux familles de l'uranium ($^{238}_{92}U$ *et* $^{235}_{92}U$), la famille du thorium 232 ($^{232}_{90}\mathrm{Th}$) (voir schémas annexes 2, 3, 4), ainsi que l'isotope 40 de potassium ($^{40}_{19}\mathrm{K}$ de période T = $1{,}27.10^{9}$ années) sans descendant radioactif.

L'abondance de l'uranium naturel est de l'ordre de 1 à quelques mg/kg dans l'écorce terrestre (l'abondance du thorium est trois fois plus importante). Elle est généralement plus élevée dans les granites que dans les roches sédimentaires. A la concentration de 400 mg/kg, une roche est qualifiée de « minerai d'uranium » (cette notion est fortement liée aux critères économiques, les gisements exploitables ayant des teneurs qui varient de 0,04 % à 1,5 % ; à noter la teneur exceptionnelle de 14 % dans le gisement le plus riche connu jusqu'à présent, découvert dans la province de SASKATCHEWAN du grand nord canadien).

Dans certaines régions les eaux de surface peuvent atteindre des concentrations en uranium de 1 µg/l et les eaux souterraines (dont font partie les eaux minérales) peuvent dépasser 5 µg/l.

Le potassium 40 radioactif est présent dans le potassium naturel, dans la proportion de 0,01 %.L'abondance du potassium naturel dans l'écorce terrestre est de 23 g/kg (soit 2,3 mg/kg de potassium 40). Les aliments en contiennent 3 à 40 g/kg. Dans le corps humain, la régulation métabolique assure une concentration régulière d'environ 2 g/kg (soit 0,2 mg/kg de potassium 40).

En dehors de ces radionucléides de périodes très longues (les 2 familles d'uranium, de thorium et le potassium 40), il en existe de périodes encore plus longues (et de ce fait très faiblement actifs) : rubidium 87 (T = $4{,}7.10^{10}$ ans), lanthane 138 (T = $1{,}3.10^{11}$ ans), samarium 147 (T = $1{,}1.10^{11}$ ans), platine 190 (T = $6{,}1.10^{11}$ ans).

D'autres radionucléides naturels sont formés en permanence par interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère (et même avec le sol). Il s'agit notamment du carbone 14 ($^{14}_{6}\mathrm{C}$) et du tritium ($^{3}_{1}\mathrm{H}$). L'abondance moyenne du carbone 14 dans le carbone naturel est de l'ordre de 10^{-12} et celle du tritium dans l'hydrogène de l'ordre de 10^{-18}.

Il y a environ 50 radionucléides naturels (tableau 2) dont certains sont très éphémères comme par exemple l'astate 216 (T = 0,3 ms) ou les isotopes 215, 214 et 212 du polonium dont les périodes s'échelonnent entre 1,8 ms et 0,3 µs.

A côté de ces radionucléides naturels on dénombre plus de 1500 nucléides radioactifs artificiels qui sont élaborés dans des accélérateurs de particules, dans des réacteurs atomiques ou au cours des essais d'armes nucléaires. Le comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a estimé que les sources naturelles contribuent pour plus de 98 % à la dose de rayonnements reçue par la population (à l'exclusion des irradiations médicales). A l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme au rayonnement naturel est de l'ordre de 2,4 mSv/an.

2.4 EXPOSITION DES ORGANISMES VIVANTS AUX RAYONNEMENTS RADIOACTIFS

Les organismes vivants sont soumis à deux types d'exposition : externe et interne.

Exposition externe

Comme le nom l'indique, il s'agit de rayons qui pénètrent dans l'organisme en venant de l'extérieur. On distingue les rayonnements cosmiques, terrestres et ceux qui résultent des activités humaines.

- **Rayonnement cosmique** : les rayons cosmiques primaires (particules ionisées de très grande énergie) en provenance de l'espace interplanétaire, principalement du soleil, produisent par collision avec les noyaux de l'atmosphère des cascades de rayons cosmiques secondaires. Le flux et l'énergie des rayons cosmiques qui atteignent le sol, varient avec la latitude géomagnétique et l'altitude. Ainsi le corps humain reçoit en moyenne, au niveau de la mer, l'équivalent de dose de 0,35 mSv/an et 0,6 mSv/an à 1500 m d'altitude (au cours d'un vol Paris-New York, le corps humain reçoit l'équivalent de dose de 0,03 mSv).

- **Rayonnement terrestre** : il est dû à la présence dans le sol des radioéléments naturels : potassium 40 et les familles d'uranium et de thorium. Il faut noter que les particules α et β ne quittent pratiquement pas le sol (même les particules α et β qui résultent de la désintégration du radon et de ses descendants présents dans la couche d'air au dessus du sol, ont une très faible probabilité d'atteindre les tissus vivants puisqu'elles sont arrêtées soit par l'air soit par l'épiderme). Le rayonnement terrestre est donc essentiellement constitué de photons γ. En moyenne, l'être humain reçoit en provenance du sol l'équivalent de dose de 0,41 mSv/an, les écarts variant de 0,1 à 4 mSv/an, suivant la nature des terrains (sédimentaires ou granitiques). Par exemple un ouvrier mineur qui se trouve dans une galerie creusée dans du minerai à 0,1 % d'uranium, reçoit l'équivalent de dose de l'ordre de 0,005 mSv/h de rayonnement γ.

- **Rayonnements résultant des activités humaines** : écrans de télévision, radiographies médicales ou radiothérapie (à l'occasion d'une radiographie pulmonaire, le corps humain reçoit l'équivalent de dose d'environ 1 mSv), sondes radioactives et appareils divers utilisés dans l'industrie. On estime qu'en moyenne, les êtres vivants reçoivent l'équivalent de dose d'environ 1 à 1,2 mSv/an, provenant du rayonnement résultant des activités humaines.

Exposition interne

L'exposition interne résulte de la désintégration des radioéléments présents dans l'organisme humain : potassium 40, carbone 14 ainsi que les descendants des familles d'uranium et de thorium.

Les deux premiers (potassium 40 et carbone 14) sont de loin les plus abondants (environ 50 Bq/kg chacun), mais fort heureusement l'énergie des particules β émises à l'occasion de leur désintégration, est relativement faible (respectivement 1,32 Mev et 0,165 Mev) ce qui donne des équivalents de doses absorbées de 0,29 mSv/an et 0,04 mSv/an pour chacun des éléments.

Tous ces radioéléments présents dans le corps humain délivrent un équivalent de dose de l'ordre de 1, 65 mSv/an. Ils pénètrent dans l'organisme soit par ingestion (boisson, nourriture) soit par inhalation.

- **Ingestion** : Les radioéléments naturels présents dans le sol se retrouvent fatalement dans les eaux ainsi que dans la chaîne alimentaire. Par exemple dans certaines eaux de surface, les teneurs en uranium peuvent atteindre 1 µg /l (25 mBq/l). Dans les eaux souterraines les concentrations sont d'environ 0,1 à 5 µg/l en uranium naturel (2,5 à 125 mBq/l), 0,81 à 27 pg/l en radium 226 (30 à 1000 mBq/l). Bien entendu, les autres descendants (surtout les descendants à vie longue) sont également en présence mais en quantité infinitésimale. Le thorium est relativement peu soluble dans les eaux et sa concentration dépasse rarement 1 µ/l (4 mBq/l). Le radon dont la concentration dans les eaux souterraines (ainsi que dans les eaux minérales) peut être assez élevée, s'échappe de l'eau dès que celle-ci est mise à l'air libre. Sa libération est également accélérée par les différentes manipulations (transvasement, agitations...) auxquelles est soumise l'eau avant d'être consommée. Par ailleurs la période radioactive du radon étant assez faible (54,5 s pour l'isotope 220 est 3,8 j pour le 222) sa présence dans l'eau au moment de son ingestion, est généralement faible.

- **Inhalation** : Les radioéléments inhalés sont principalement les isotopes de radon, leurs descendants en suspension dans l'air sous forme d'aérosols et accessoirement, les poussières susceptibles de renfermer des traces d'uranium et de thorium.

  Le radon naturel (constitué de 3 isotopes 219, 220, 222 qui font partie respectivement des familles de l'uranium 235, du thorium 232 et de l'uranium 238) est le seul élément radioactif naturel gazeux. Il fait partie des « gaz rares » (ou « gaz inertes ») dans le sens qu'il ne réagit pas chimiquement avec les autres corps ce qui lui confère une grande mobilité. Ainsi, les atomes de radon qui naissent de la désintégration directe du radium présent dans l'écorce terrestre, migrent librement vers la surface du sol par les interstices et les fissures (il se dissout également facilement dans les eaux souterraines).

  Au cours de sa migration vers la surface, il s'accumule dans les cavités naturelles ainsi que dans les galeries et les caves des habitations. A l'approche de la surface, il diffuse plus ou moins abondamment dans l'air, selon les variations de la pression atmosphérique. Au dessus du sol, on le trouve à des concentrations de quelques Bq par m^3. *Une campagne de mesures faite sur le territoire national a mis en évidence une concentration moyenne de 66 Bq/m^3, avec des moyennes régionales pouvant dépasser 150 Bq/m^3 dans les zones granitiques.*

  L'isotope 222 est plus abondant que le 220. La présence de radon 219 est insignifiante pour deux motifs : sa période est très courte (4 secondes, contre 54 secondes pour le radon 220 et 3,8 jours pour le radon 222) et l'uranium 235 dont il est descendant, est également peu abondant. Le radon se désintègre en émettant des particules α (6,3 Mev pour le radon 220 et 5,5 Mev pour le radon 222) et en donnant naissance à des descendants, eux-mêmes radioactifs, dont les périodes sont très courtes (0,16 s pour le polonium 216, 0,3 ms pour l'astate 216, 3 mn pour le polonium 218, 1,3 s pour l'astate 218, 20 mn pour le bismuth 214, 0,16 ms pour le polonium 214).

  Le radon ainsi que ses descendants présents dans l'air sous forme d'ions libres ou fixés sur des aérosols, sont inhalés par les êtres vivants. Le radon (gaz) est exhalé assez rapidement, donc le nombre d'atomes désintégrés pendant son séjour dans les poumons n'est pas très élevés. Par contre les descendants inhalés se fixent dans les poumons et en peu de temps ils émettent des particules α très énergétiques. Ainsi, bien que n'étant pas lui même très nocif, le radon est un indicateur du nombre de descendants émetteurs α présents dans l'air. Pour des raisons sanitaires, dans les habitations où la concentration en radon 222 dépasse 400 Bq/m^3, des mesures correctives (amélioration de l'isolation, ventilation) sont recommandées.

2.5 RADIOACTIVITE DES EAUX MINERALES

Les eaux minérales, comme toutes les eaux souterraines, contiennent des éléments radioactifs naturels dont les concentrations varient en fonction de paramètres tels que : nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), température, solubilité de l'élément concerné, etc... Les radioéléments les plus significatifs sont : le potassium 40, l'uranium naturel, le radium 226, le radon et accessoirement le thorium.

- **Potassium 40**. Il représente 0,01 % du potassium naturel, ce dernier étant assez abondant dans l'écorce terrestre (23 g/kg) ; les eaux minérales contiennent généralement entre 1 et 200 mg/l de potassium naturel, mais il existe quelques cas (pour les eaux très salées) avec des teneurs dépassant le 200 mg/l (à la teneur de 10 mg/l de potassium naturel correspond une activité β d'environ 260 mBq/l).

- **Uranium naturel**. Sa concentration dans les eaux minérales est généralement faible et ne dépasse pas 2 µg/l (50 mBq/l de radioactivité α). Toutefois à l'émergence, certaines eaux minérales peuvent avoir des teneurs dépassant 10 µg/l.

- **Radium 226**. Ce radioélément, descendant de l'uranium 238, est émetteur α (à coté du radium 226 on rencontre également les deux autres descendants du thorium 232 : le radium 228 – émetteur β et le radium 224 émetteur α). Les teneurs en radium 226 dans les eaux minérales sont très faibles, de l'ordre du picogrammes ; sa concentration dans l'eau est indiquée en mBq/l. Les eaux minérales peuvent avoir des concentrations de quelques dizaines à quelques centaines de mBq/l.

- **Radon**. Il est généralement très abondant dans les eaux souterraines et aussi dans les eaux minérales. A l'émergence, il n'est pas rare de rencontrer des concentrations de quelques dizaines à plusieurs centaines (voire quelques milliers) de Bq/l. Cependant, comme il est indiqué au paragraphe précédent, le radon s'échappe de l'eau minérale dès que celle-ci est mise à l'air libre. Ce phénomène peut se traduire par des accumulations de radon dans les réservoirs de stockage ainsi que dans les galeries ou sont situées les captages des sources d'eau minérale.

- **Thorium**. Le thorium compte 6 isotopes naturels, le plus abondant étant l'isotope 232 suivi des isotopes 228 et 230. La solubilité du thorium dans les eaux souterraines est très faible et dépasse rarement 1 µg/l. A la teneur de 1 µg/l de thorium 232 correspond une radioactivité α de 4 mBq/l.

A titre d'information, il faut citer la présence dans les eaux minérales de deux autres éléments radioactifs naturels, le tritium et le carbone 14. La présence de ces deux isotopes radioactifs est utilisée surtout pour étudier l'âge de l'eau (voir note technique n° 7). Leur concentration dans les eaux minérales est très faible. A titre de rappel voici quelques éléments.

- **Le carbone 14** se forme dans l'atmosphère terrestre sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote :

$$^{14}_{7}N + n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

La concentration moyenne du carbone 14 dans le carbone naturel (principalement le carbone 12 stable) est de l'ordre de 10^{-12}. Il se désintègre en émettant des particules β (0,165 MeV) suivant le schéma ${}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + \beta$ (un neutron du noyau se transforme en proton).

Sa période est T = 5600 a.

Dans les eaux minérales, le carbone se trouve principalement sous forme d'ions bicarbonates (HCO_3). Les eaux les plus minéralisées en contiennent de l'ordre de 5 à 7 g, ce qui correspond à 1 à 1,3 g de carbone naturel. Or, l'activité radioactive du carbone 14 contenu dans 1 g de carbone naturel (en prenant une concentration de 10^{-12}) est d'environ 0,2 Bq de rayonnement β (0,165 MeV).

- **Le tritium** est l'isotope radioactif d'hydrogène qui se forme dans l'atmosphère sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote :

$${}^{14}_{7}N + n \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{3}_{1}H$$

Cette production naturelle de tritium conduit à une concentration d'environ 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène stable $({}^{1}_{1}H)$. L'industrie nucléaire contribue à une augmentation de la concentration du tritium dans les eaux (à signaler la très forte augmentation de l'abondance du tritium dans les eaux de pluie après les essais atomiques dans l'atmosphère, entre 1950 et 1960).

La désintégration du tritium donne lieu à une émission de rayonnement β négatif (0,0186 MeV) avec production d'hélium stable. La période est T = 12,2 a.

${}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \beta$ (transformation d'un neutron en proton)

Pour caractériser la concentration du tritium dans les eaux minérales on utilise l'unité dite "UNITE TRITIUM" (UT).

1 UT = 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène.

Dans les eaux minérales, les concentrations en tritium s'échelonnent de 1 UT à environ 25 UT.

Les eaux très "anciennes" sont caractérisées par des concentrations d'1 ou 2 UT.

Les eaux "jeunes" ont des valeurs plus élevées.

A une eau ayant 1 UT correspond une radioactivité de 0,12 Bq/l (de rayonnement β de 0,0186 Mev).

3. REGLEMENTATION ET TEXTES DE REFERENCE

3.1 RÉGLEMENTATION APPLICABLE AUX EAUX MINÉRALES

La radioactivité des eaux minérales naturelles est évoquée dans deux textes réglementaires :

- décret 57-404 du 28 mars 1957 ; l'article 6 stipule que dans le cadre de l'instruction d'une demande d'autorisation d'exploiter une source d'eau minérale naturelle, il est procédé "**s'il y a lieu**, ..., à une détermination de la radioactivité."

- décret 89-369 du 6 juin 1989 (applicable uniquement aux eaux minérales naturelles conditionnées) ; à l'annexe I qui définit les prescriptions auxquelles est subordonnée l'exploitation d'une eau minérale naturelle, il est indiqué (§ 1.2.10) qu'il doit être procédé à la détermination de "la radio-actinologie à l'émergence" (les mêmes termes sont utilisés au § 1.2.10 de l'annexe 1 de la directive du Conseil n° 80/777/CEE du 15 juillet 1980 relative aux eaux minérales naturelles conditionnées).

Jusqu'à présent, aucun autre texte (ni circulaire, ni arrêté ministériel) ne précise en quoi consiste exactement la détermination de la radioactivité (ou de la "radio-actinologie"). De même aucun texte ne traite des limites "d'équivalent de dose absorbée" ou de seuil de concentrations en éléments radioactifs dans les eaux minérales.

En application des dispositions des décrets 57-404 et 89-369, l'Office pour la Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI) procède systématiquement à des analyses de radioactivité des eaux de toutes les nouvelles sources. Les bulletins d'analyse comportent les éléments suivants :

- activité volumique bêta-totale en Bq/l ou mBq/l

- activité volumique alpha-totale en Bq/l ou mBq/l

- radium 226 en Bq/l ou mBq/l

- uranium naturel en µg/l

- thorium en µg/l

- tritium en Bq/l

- potassium en mg/l

- radon 222

Les éléments dont les résultats sont fournis en Bq/l, sont déterminés par des méthodes spécifiques aux mesures de radioactivité (compteurs à scintillomètre, compteur Geiger...).

Les activités volumiques bêta-**totale** et alpha-**totale** ou bêta-**globale** et alpha-**globale**, sont déterminées à titre indicatif sur les résidus secs des échantillons d'eau. Il en résulte que la valeur portée sur le bulletin d'analyse ne comprend pas l'activité alpha du radon.

Les valeurs de l'activité bêta-totale des eaux minérales sont généralement inférieures à 1 Bq/l. Cependant il peut arriver que certaines eaux qui circulent dans des terrains granitiques ou qui sont fortement chargées en sels de potassium (1 mg de potassium naturel a une activité d'environ 26 mBq), aient des valeurs atteignant 10 Bq/l.

Les valeurs de l'activité alpha-totale s'échelonnent entre 0,01 et 1 Bq/l, voire exceptionnellement 3 Bq/l.

La concentration en radium 226, exprimée en Bq, varie généralement entre 0,01 et 1 Bq/l. Le radium est l'élément qui contribue généralement le plus à l'activité volumique alpha-totale.

L'uranium naturel, exprimé en µg/l, contribue, comme le radium à l'activité volumique alpha-totale (1 µg d'uranium naturel a une activité de 24 mBq). La concentration dans les eaux minérales varie généralement entre 0,1 µg/l et 5 µg/l. Exceptionnellement, certaines eaux peuvent dépasser à l'émergence 10 µg/l (240 mBq/l).

La teneur en thorium est généralement inférieure à 1 µg/l (environ 4 mBq/l).

La teneur en potassium naturel est donnée à titre indicatif. Le potassium 40 présent dans le potassium naturel (abondance de 10^{-4}), contribue fortement à l'activité bêta-totale : 1 mg de potassium naturel représente une activité bêta de 26 mBq. Or les eaux minérales peuvent en contenir plus de 100 mg/l (2600 mBq/l).

La détermination de la concentration en tritium est faite à titre indicatif, comme cela se pratique systématiquement pour les eaux de consommation courante dans le but de déceler un apport éventuel de radionucléides artificiels rejetés accidentellement par l'industrie nucléaire dans les eaux de surface (la directive européenne impose de vérifier que dans l'eau de consommation, l'activité du tritium reste inférieure à 100 Bq/l – dans le cas contraire, il y a suspicion d'une présence de radioéléments artificiels). Les méthodes de détermination du tritium utilisées par l'OPRI ne permettent pas de descendre sous le seuil de 10 Bq/l (environ 83 UT). Or dans les eaux minérales, la concentration en tritium est souvent inférieure à 5 UT (0,6 Bq/l) et elle dépasse rarement 25 UT (3 Bq/l). Le bulletin d'analyse de l'OPRI porte pratiquement toujours la mention "tritium : < 10 Bq/l".

Si les activités volumiques alpha-totale ou bêta-totale d'une eau minérale naturelle dépassent les valeurs-guides recommandées par l'OMS pour les eaux de boisson (voir annexe 5 : 0,1 Bq/l pour alpha-globale et 1 Bq/l pour bêta-globale), l'OPRI accompagne le bulletin d'analyse d'un commentaire en conseillant parfois de limiter la consommation de cette eau à 2 l/jour ou encore à quelques litres par semaine.

Il est à signaler que les prélèvements transmis pour analyse à l'OPRI sont effectués à l'émergence. Or, il a été constaté que les traitements de déferrisation ou de démanganisation pratiqués sur certaines eaux minérales conditionnées, contribuent à faire baisser la radioactivité de manière assez significative. Par conséquent, pour avoir une meilleure estimation de la quantité de radionucléides ingérés avec l'eau minérale, il est également procédé à la détermination de la radioactivité de l'eau, après son conditionnement.

3.2 RÉGLEMENTATION APPLICABLE AUX EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE

Les textes applicables aux eaux destinées à la consommation humaine (adduction en eau du public) sont :

- décret 89/3 du 3 janvier 1989 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles ;

- directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

Le décret 89/3 reprend en annexe les limites de certains paramètres physico-chimiques que doivent respecter les eaux de consommation courante, mais jusqu'à présent il n'existe aucun critère en ce qui concerne la radioactivité.

La directive 98/83/CE (non applicable aux eaux minérales naturelles), comporte en annexe I, partie C, un tableau concernant la radioactivité, dans lequel figurent deux paramètres, le tritium (valeur paramétrique de 100 Bq/l) et "dose totale indicative" (valeur paramétrique de 0,10 mSv/an). Cette directive doit faire l'objet d'une transposition dans la réglementation nationale avant la fin de l'an 2000 et les normes de qualité devront être respectées en 2003 (à noter que généralement le respect des normes de radioactivité pose moins de problème que les concentrations limites de certains éléments indésirables).

3.3 RECOMMANDATIONS DE L'OMS

Les normes européennes de radioactivité applicables aux eaux de consommation (et celles qui seront vraisemblablement fixées pour les eaux minérales naturelles), s'inspirent des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé, dont un extrait figure en annexe 5 de la présente note.

Ces recommandations sont basées sur les principes généraux suivants :

- l'OMS considère qu'à l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme aux rayonnements d'origine naturelle est de l'ordre de 2,4 mSv/an ;

- la **dose effective engagée** attribuable à la consommation d'eau pendant un an, doit être inférieure à 5 % de la dose d'origine naturelle (2,4 mSv/an), soit 0,1 mSv/an ;

- la **dose effective engagée** est la dose effective totale reçue tout au long de la vie par suite d'ingestion de radionucléides (la dose effective totale est la somme des doses doublement pondérées pour tenir compte des organes touchés et du type de rayonnement, α ou β) ;

- pour le calcul de la dose effective engagée, on considère qu'un adulte consomme **2 litres d'eau par jour pendant toute l'année (et toute sa vie)** ;

- le métabolisme est pris en compte dans l'estimation des radionucléides qui persistent dans le corps humain, après leur ingestion avec l'eau de boisson ;

- en première approche, on considère que la dose effective engagée ne dépasse pas 0,1 mSv/an si les activités globales alpha et bêta, restent respectivement inférieures à 0,1 Bq/l et 1 Bq/l ;

- si l'une ou l'autre des activités globales alpha et bêta, dépasse respectivement 0,1 Bq/l et 1 Bq/l, il faut procéder à l'identification des radionucléides en présence et faire le calcul précis de la dose effective engagée (si la dose effective engagée est supérieure à 0,1 mSv/an, l'eau est considérée impropre à la consommation et des mesures correctives doivent être envisagées).

4. CONCLUSION

Les eaux minérales, comme toutes les eaux souterraines, contiennent des radionucléides d'origine naturelle, dont la concentration dépend de nombreux paramètres : nature des terrains traversés, temps de contact, température de l'eau, solubilité des éléments, ...

L'évaluation de l'impact sur l'organisme humain des radionucléides ingérés par la consommation d'eau, est très complexe. Pour la faire sérieusement, il faut connaître la quantité de chaque radioélément absorbé et tenir compte de la faculté de l'organisme humain à l'éliminer ou à le retenir.

Le seul document de référence disponible actuellement est la recommandation de l'OMS qui s'applique à l'eau de consommation courante. Elle s'appuie sur les critères suivants :

- la dose effective engagée attribuable à la consommation d'eau pendant un an, doit rester inférieure à 0,1 mSv ;

- pour le calcul de la dose effective engagée, on considère qu'un adulte consomme 2 litres d'eau par jour, pendant toute sa vie ;

- le calcul de la **dose** (de radioactivité) **absorbée** (en mSv/an) par les tissus vivants, à partir de la quantité de radionucléides (Bq/l) contenus dans l'eau consommée, se fait à l'aide de "facteurs de conversion" qui tiennent compte du métabolisme (faculté de l'organisme à éliminer les radionucléides ingérés).

La directive européenne 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixe à 0,1 mSv/an la "valeur paramétrique" de la "dose totale indicative" (il faut constater avec regret que la signification exacte de cette expression ne figure ni dans la directive 98/83/CE, ni dans la directive générale 96/29/EURATOM du Conseil du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants).

Pour les eaux minérales, la réglementation française ne comporte pas encore de normes de qualité en matière de radioactivité. Afin de combler cette lacune, un groupe de travail piloté par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, a été chargé d'examiner ce problème.

BIBLIOGRAPHIE

1990 Eaux minérales et radioactivité – Hydrogéologie n° 4 – pp 267-278 – Édition BRGM par M.L. REMY et N. LEMAITRE

1994 Directives de qualité pour l'eau de boisson – Deuxième édition – Organisation Mondiale de la Santé – Genève 1994

1994 L'analyse de l'eau – Rodier – 8ème Édition DUNOD

1995 Le tritium de l'Environnement à l'Homme – Les éditions de Physique – IPSN – Y. BELOT, M. ROY, H. METIVIER

1998 Journal Officiel des Communautés Européennes – L330/32 à 54

Tableau 1

TERMES ET UNITES RADIOLOGIQUES

TERME	DEFINITION	UNITE	VALEUR
Activité (A)	Quotient de dN par dt où dN est le nombre de transformations nucléaires spontanées qui se produisent dans une quantité de radionucléide pendant le temps dt. $A = \frac{dN}{dt}$	Becquerel (Bq) nom spécial de l'unité SI d'activité. L'emploi du Curie (Ci) ou de son sous mulliple le pico-Curie (pCi) est encore rencontré. Le Ci est une unité historique *qui correspond* à l'activité de 1 g de radium 226.	1 Bq = 1 désintégration par seconde 1 Ci = $3,7.10^{10}$ Bq 1 Bq = $2,7027.10^{-11}$ Ci
Dose absorbée (D)	Quotient de dε par dm où dε est l'énergie moyenne communiquée par les rayonnements ionisants à la matière dans un élément de volume et *dm, la masse de matière contenue* dans cet élément de volume. $D = \frac{d\varepsilon}{dm}$	Gray (Gy) nom spécial de l'unité SI de dose absorbée. L'emploi du rad (rd) est encore rencontré.	1 Gy = 1 J/kg 1 rd = 10^{-2} Gy 1 Gy = 100 rd
Équivalent de dose absorbée (H)	Produit de la dose absorbée D par le facteur de qualité et par le produit de tous les autres facteurs modificatifs. Pour l'irradiation externe par les rayonnements X, γ et des électrons β, le facteur de qualité est égal à 1. Pour l'irradiation interne par les rayonnements α le facteur de qualité est égal à 20.	Sievert (Sv) nom spécial de l'unité SI d'équivalent de dose. L'emploi du rem est encore rencontré.	1 Sv = 1 J/kg 1 rem = 10^{-2} Sv 1 Sv = 100 rem

Tableau 2

RADIONUCLEIDES NATURELS

Nom	Symbole	Numéro atomique	Isotopes
Actinium	Ac	89	227, 228
Astate	At	85	215, 216, 218
Bismuth	Bi	83	210, 211, 212, 214
Carbone	C	6	14
Francium	Fr	87	223
Lanthane	La	57	138
Platine	Pt	78	190
Plomb	Pb	82	210, 211, 212, 214
Polonium	Po	89	210, 211, 212, 214, 215, 216, 218
Potassium	K	19	40
Protactinium	Pa	91	231, 234
Radium	Ra	88	223, 224, 226, 228
Radon	Rn	86	219, 220, 222
Rubidium	Rb	37	87
Samarium	Sm	62	147
Thorium	Th	90	227, 228, 230, 231, 232, 234
Thallium	Tl	81	206, 207, 208, 210
Tritium	H	1	isotope 3 de l'hydrogène
Uranium	U	92	234, 235, 238

ANNEXE 1

EXEMPLES DE CALCUL DES ACTIVITES ET DES DOSES ABSORBEES

Exemple 1 : Le corps humain contient environ 140 g de potassium naturel pour un poids moyen de 70 kg, soit 2 g de *potassium naturel par kg de tissus vivants* (les aliments en contiennent entre 3 et 40 g/kg de matière sèche, toutefois, quelle que soit la quantité ingérée, la régulation métabolique assure une concentration moyenne dans le corps humain d'environ 2 g/kg).

Le potassium naturel est composé essentiellement de potassium 39 ($^{39}_{19}K$) stable et d'une très faible quantité (proportion 10^{-4}) de potassium 40 radioactif ($^{40}_{19}K$) qui se désintègre suivant 2 schémas :

$^{40}_{19}K \rightarrow {}^{40}_{20}Ca +$ émission de particule β de 1,32 MeV (89 %)

$^{40}_{19}K \rightarrow {}^{40}_{18}Ar$ (capture d'électron) avec émission de photons γ de 1,46 MeV (11 %).

Dans 2 g de *potassium naturel* (environ 310.10^{20} atomes), il y a 0,2 mg (310.10^{16} atomes) de potassium 40 radioactif, dont l'activité radioactive est de l'ordre de 52 Bq (46 Bq de particules β et 6 Bq de photons γ).

L'énergie dissipée dans 1 kg de tissus vivants par les particules β est d'environ :

$46.1,32.1,6.10^{-13}$ (J/s.kg) = $97,1.10^{-13}$ Sv/s soit de l'ordre de 0,3 m Sv/an.
(1 Mev = $1,6.10^{-13}$ J)

Exemple 2 (contrairement à l'exemple du potassium qui correspond à un cas concret, l'exemple ci-après qui concerne le radium, est fictif) : La masse de 0,1 ng (10^{-10} g) de radium 226 ($^{226}_{88}Ra$) représente environ 27.10^{10} atomes. L'activité radioactive de cette masse est de 37 Bq, c'est à dire qu'à chaque seconde environ 4 atomes de radium 226 se désintègrent en donnant naissance à 4 atomes de radon 222 et en émettant 4 particules α de 4,8 MeV chacune et des photons γ de faible énergie (environ 0,187 MeV par désintégration).

Si cette masse de 0,1 ng de radium 226 se trouvait disséminée dans 1 kg de tissus musculaires, ces derniers absorberaient à chaque seconde l'énergie des 4 particules α.

L'énergie radioactive dissipée serait donc de :

4.4,8 MeV/s.kg = 4.4,8.1,6.10^{-13} J/s kg
(1 MeV = 1,6.10^{-13} J)

soit 30,7.10^{-13} J/s.kg

S'agissant de tissus vivants, "l'équivalent de dose absorbée" est obtenu en multipliant cette énergie par FQ = 20 (facteur de qualité des particules α) :

20.30,7.10^{-13} J/s.kg = 614.10^{-13} Sv/s

Si la concentration en radium 226 dans les tissus musculaires restait inchangée (0,1 ng/kg), l'équivalent de dose absorbée durant une année serait :

614.10^{-13}.365.24.3600 (Sv/an) soit environ 2 m Sv/an.

Si les rayons γ émis à l'occasion de la désintégration des 4 atomes de radium 226, dissipaient toute leur énergie dans la même masse de tissus vivants (ce qui n'est pas toujours le cas, puisque la masse musculaire n'arrête qu'une partie des rayons γ) l'équivalent de dose absorbée dû aux rayons γ, serait de :

4.0,187.1,6.10^{-13} (Sv/s) = 1,2.10^{-13} Sv/s)
valeur insignifiante par rapport à l'équivalent de dose absorbée des particules α.

Exemple 3 : Un minerai d'uranium contient environ 1 g d'uranium naturel par kg de substance rocheuse (la teneur en uranium dans le minerai peut varier de 0,04 % à 1,5 % ; pour les teneurs inférieures à 0,03 % on considère qu'il s'agit de « roche stérile »). L'uranium naturel est composé de 3 isotopes radioactifs d'uranium (234, 235 et 238).

La masse de 1 g d'uranium 238 représente $(\frac{6,023.10^{23}}{238})$ atomes. La période étant T = 4,5.10^{9} années, l'activité radioactive de cette masse est 12400 Bq.

L'activité de 1 g d'uranium 235 (T = 7.10^{8} années) est de 80 000 Bq et celle de 1 g d'uranium 234 (T = 2,5.10^{5} années) est de 222.10^{6} Bq.

L'uranium naturel étant composé de 99,3 % de U^{238}, 0,7 % de U^{235} et 0,005 % de U^{234}, l'activité d'un bloc de minerai d'uranium naturel, sera de :

(0,993.12 400 + 0,007.80 000 + 5.10^{-5}.222.10^{6})Bq, soit environ 24 000 Bq/kg.

Les trois isotopes radioactifs de l'uranium naturel émettent des particules α d'environ 4,2 Mev chacune, accompagnées d'un rayonnement γ d'environ 0 ,05 Mev.

Les particules α étant arrêtées par la substance rocheuse du bloc de minerai (ce qui n'est pas le cas pour les rayons γ), l'énergie dissipée (ou la « dose absorbée ») dans le bloc sera :

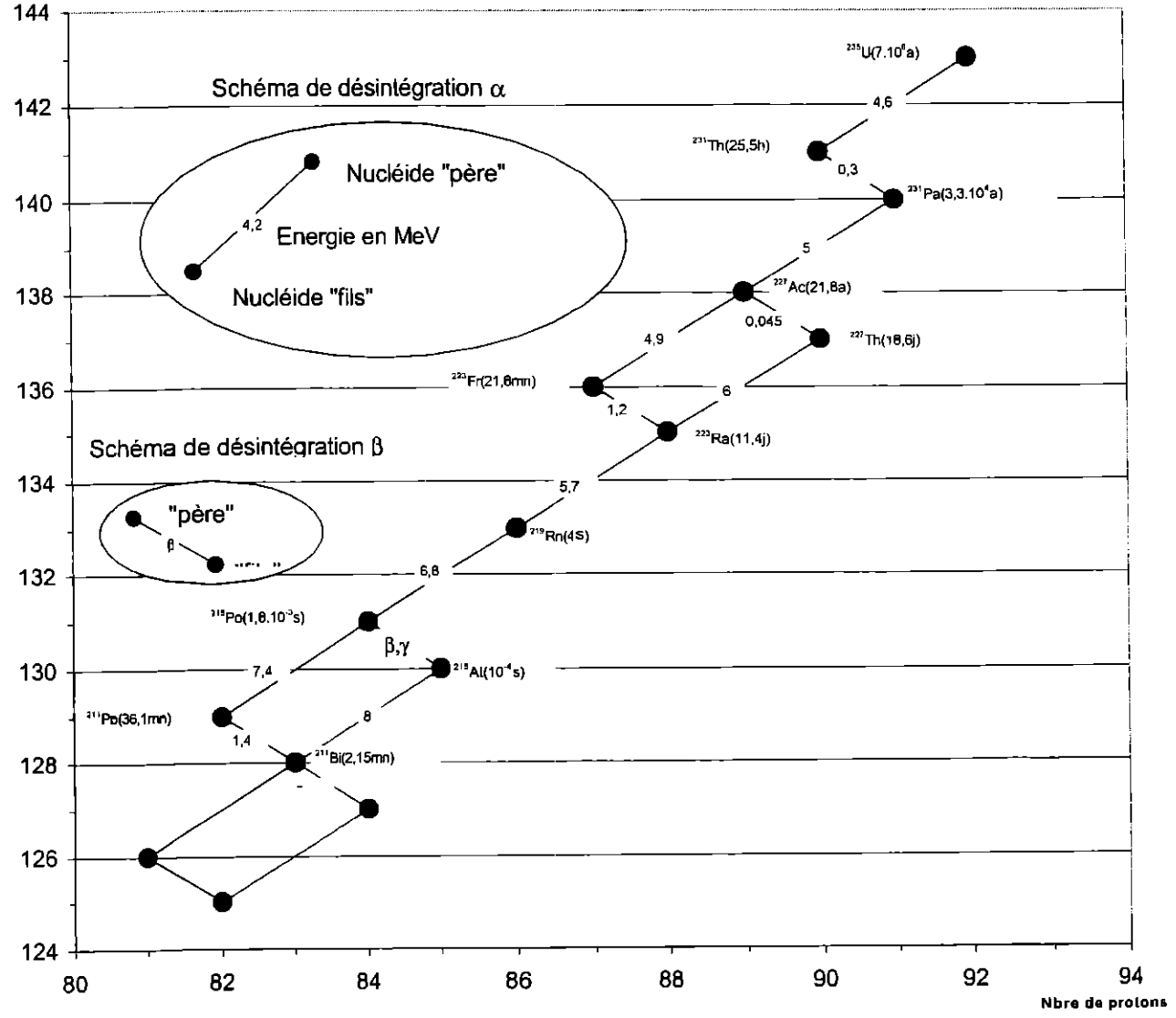
24 000.4,2 MeV/s.kg = 24000.4,2.1,6.10^{-13} J/s.kg = 161.10^{-10} Gy/s

(ce calcul fait abstraction du rayonnement α et β émis par les autres descendants des deux familles d'uranium ou du thorium certainement présents dans le bloc de minerai).

Eau Minérale et Radioactivité

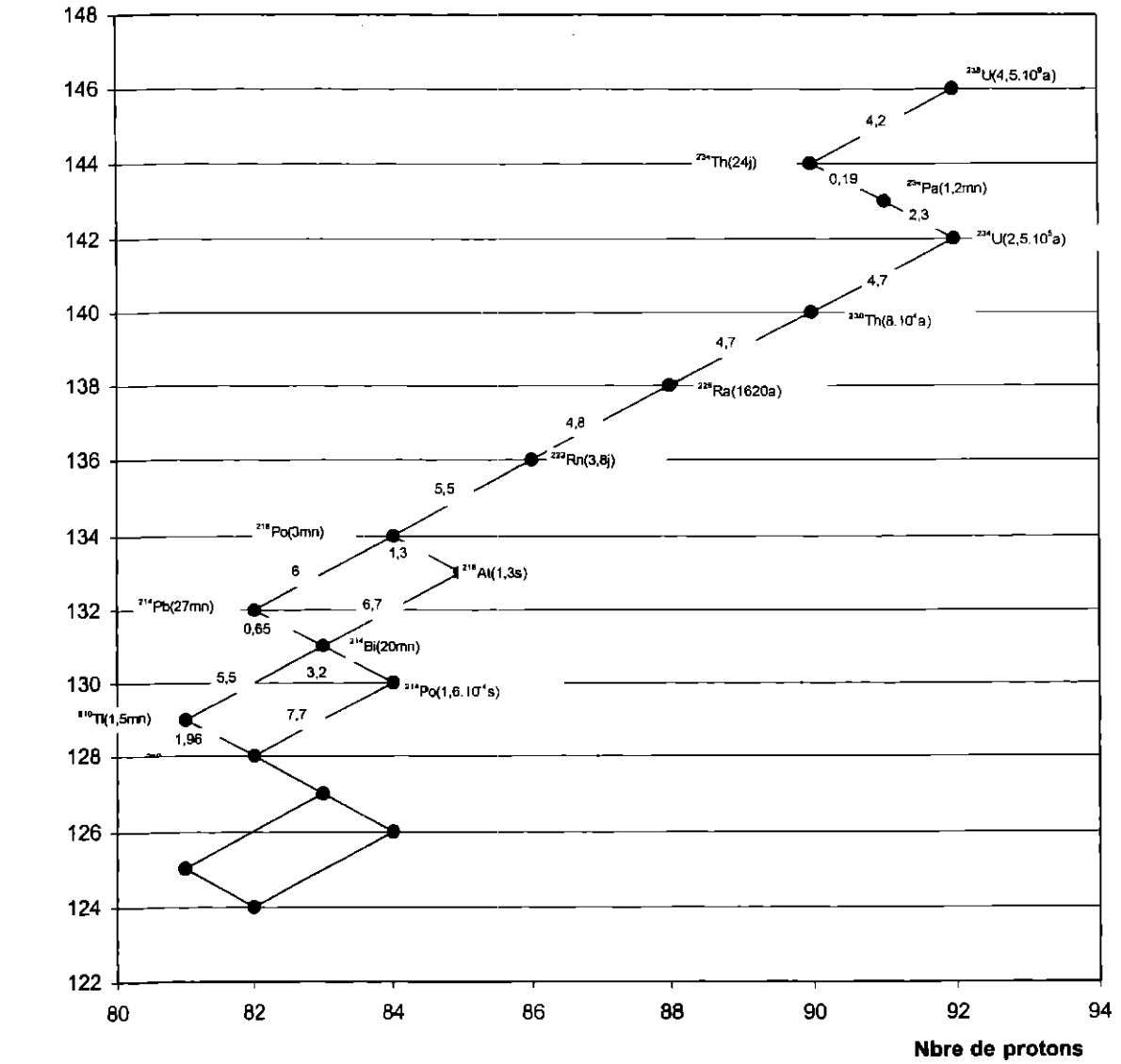
ANNEXE 2

Famille de l'uranium 235



Eau Minérale et Radioactivité

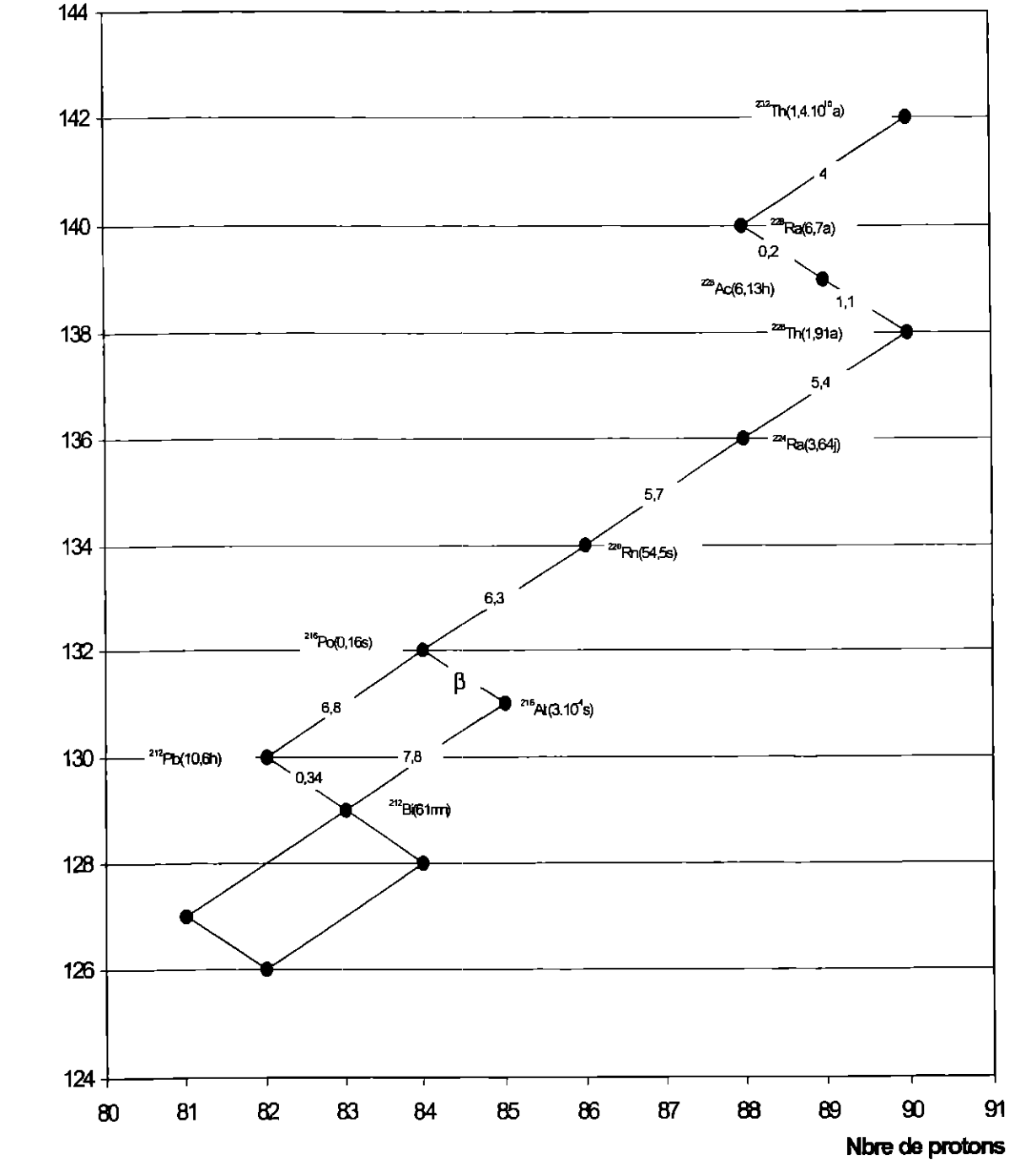
ANNEXE 3
Famille de l'uranium 238



Eau Minérale et Radioactivité

ANNEXE 4

Famille du thorium 232



ANNEXE 5

EXTRAIT DES RECOMMANDATIONS OMS

DIRECTIVES DE QUALITE POUR L'EAU DE BOISSON

Deuxième édition – Organisation Mondiale de la Santé – Genève 1994

4. Aspects radiologiques

4.1 Introduction

Les valeurs indicatives pour la radioactivité de l'eau de boisson recommandées dans la première édition des *Directives de qualité pour l'eau de boisson* en 1984 étaient fondées sur les données disponibles à l'époque en ce qui concerne les risques d'exposition aux sources de rayonnements. Depuis lors, de nouvelles informations ont été publiées sur les conséquences pour la santé de l'exposition aux rayonnements, les risques ont été réévalués et les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) ont été révisées. Ces nouvelles informations ont été mises à profit lors de la rédaction des recommandations du présent chapitre.

L'objet de ces recommandations relatives aux substances radioactives présentes dans l'eau de boisson est d'aider les autorités compétentes à déterminer si la qualité de l'eau la rend propre à la consommation humaine.

4.1.1 Exposition à la radioactivité ambiante

La radioactivité ambiante provient de différentes sources naturelles et artificielles. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a estimé que les sources naturelles contribuent pour plus de 98 % à la dose de rayonnements reçue par la population (à l'exclusion des irradiations médicales). La contribution des centrales nucléaires et des retombées des essais d'armes nucléaires est très faible. A l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme aux rayonnements de source naturelle est de 2,4 mSv/année. Cette exposition varie beaucoup d'un lieu à l'autre, car elle dépend de nombreux facteurs, comme l'altitude, la quantité et le type de radionucléides présents dans le sol et la quantité reçue de l'air, de l'eau et des aliments. La contribution de l'eau de boisson à l'exposition totale est très faible et elle est due en grande partie aux radionucléides naturels de la famille de l'uranium et du thorium.

Diverses activités humaines peuvent accroître la quantité de radionucléides naturels présents dans l'eau de boisson. Les radionucléides provenant des centrales nucléaires ou des applications médicales et autres utilisations de matériaux radioactifs peuvent pénétrer dans les réseaux de distribution ; l'importance de ces sources d'exposition est normalement limitée par les contrôles réglementaires pratiqués à la source ou en cours d'utilisation et c'est dans le cadre de ce mécanisme de réglementation que des mesures correctrices devront être prises en cas de risque de contamination.

4.1.2 Conséquences sanitaires potentielles de l'exposition aux rayonnements

L'exposition aux rayonnements ionisants, qu'ils soient naturels ou artificiels, peut avoir deux sortes d'effets sur la santé. Les effets pour lesquels la gravité des dommages est proportionnelle à la dose et pour lesquels il existe un seuil au-dessous duquel ils ne se produisent pas sont appelés effets "déterministes". Dans les conditions normales, la dose reçue du fait de la radioactivité naturelle et d'une exposition normale à des activités réglementées est bien inférieure à ce seuil ; aussi les effets déterministes n'ont-ils pas été pris en compte dans les recommandations ci-après. Les effets dont la probabilité d'apparition est proportionnelle à la dose sont appelés effets "stochastiques" et on considère qu'il n'existe pas de seuil au-dessous duquel ces effets n'apparaîtraient pas. L'effet stochastique le plus préoccupant est le cancer.

Étant donné que les différents types de rayonnements ont une efficacité biologique différente et que tous les organes et tissus de l'organisme n'ont pas la même sensibilité aux rayonnements, la CIPR a introduit des facteurs de pondération en fonction du rayonnement et des tissus pour établir l'équivalence des effets. La somme des doses doublement pondérées reçues par tous les tissus et organes du corps donne la mesure du dommage global et est appelée la dose effective. De plus, les radionucléides reçus par l'organisme peuvent persister dans celui-ci et, dans certains cas, l'exposition résultante peut s'étendre sur des mois ou des années. La dose effective engagée est la dose effective totale reçue tout au long de la vie par suite de l'absorption d'un radionucléide. C'est cette mesure de l'exposition qui nous intéresse ici ; dans les pages qui suivent, le terme "dose" désigne la dose effective engagée, qui est exprimée en sieverts (Sv). Le risque de conséquences dommageables pour la santé d'une exposition aux rayonnements est fonction de la dose totale reçue de toutes sources. La CIPR a révisé son estimation du risque (espérance mathématique) de cancer mortel sur la vie entière pour la population générale. Ce risque est désormais évalué à $5x10^{-2}$ par sievert. (Il n'est pas tenu compte d'un faible risque supplémentaire dû aux cancers non mortels ou aux effets héréditaires.)

4.1.3 Recommandations

• Le niveau de référence recommandé pour la dose effective engagée attribuable à la consommation d'eau de boisson pendant un an est de 0,1 mSv. Ce niveau de référence représente moins de 5 % de la dose effective moyenne attribuable annuellement au rayonnement de fond naturel.

• Au-dessous de ce niveau de référence, l'eau de boisson est propre à la consommation humaine et aucune mesure visant à réduire la radioactivité n'est nécessaire.

• En pratique, les valeurs guides recommandées pour l'activité volumique sont de 0,1 Bq/litre pour la: radioactivité alpha globale et 1 Bq/litre pour la radioactivité bêta globale.

Ces recommandations s'appliquent aux conditions normales de fonctionnement de réseaux de distribution d'eau existants ou nouveaux. Elles ne s'appliquent pas aux approvisionnements en eau contaminés lors d'un accident ayant entraîné la libération de radionucléides dans l'environnement. On trouvera ailleurs des directives applicables aux situations d'urgence (voir bibliographie).

Les recommandations ne font aucune différence entre les radionucléides d'origine naturelle ou artificielle.

4.2 Application de la dose de référence

En pratique, la dose de référence doit être exprimée en indiquant l'activité volumique des radionucléides présents dans l'eau de boisson.
La dose de radioactivité fournie à une personne par l'eau de boisson dépend non seulement de la quantité ingérée, mais aussi de facteurs métaboliques et dosimétriques. Les valeurs guides pour la concentration volumique ont été établies en admettant que la quantité totale de substances radioactives ingérées provient de la consommation de deux litres d'eau par jour pendant un an et elles ont été calculées sur la base du métabolisme chez l'adulte. Les valeurs guides n'ont pas à être modifiées pour tenir compte de l'influence de l'âge sur le métabolisme et des différences de consommation d'eau, car elles sont fondées sur l'exposition pendant toute la vie et offre une marge de sécurité suffisante. Des facteurs métaboliques et dosimétriques ont été pris en compte lors de l'élaboration des facteurs de conversion de dose, exprimés en sieverts par becquerel, qui permettent de passer de la quantité (en becquerels) de substances radioactives ingérées à une dose exprimée en sieverts.
Le tableau 8 donne des exemples de concentrations de radionucléides (concentrations de référence) correspondant à la dose de référence de 0,1 mSv/année. Ces concentrations ont été calculées en utilisant les facteurs de conversion de doses du United Kingdom National Radiological Protection Board selon la formule :

Concentration de référence (Bq/litre)

$$= \frac{1 x 10^{-4}\ (Sv / année)}{730\ (litre / année)\ x\ facteur\ de\ conversion\ de\ dose\ (Sv / Bq)}$$

$$= \frac{1.4 x 10^{-7}\ (Sv / litre)}{facteur\ de\ conversion\ de\ dose\ (Sv / Bq)}$$

Tableau 8. Activité volumique de divers radionucléides dans l'eau de boisson correspondant à une dose de 0.1 mSv pour une année de consommation

Radionucléide[a]	Facteur de conversion de dose (Sv/Bq)[b]	Valeur théorique arrondie (Bq/litre)
^{3}H	$1,8 \times 10^{-11}$	7 800
^{14}C	$5,6 \times 10^{-10}$	250
^{60}Co	$7,2 \times 10^{-9}$	20
^{89}Sr	$3,8 \times 10^{-9}$	37
^{90}Sr	$2,8 \times 10^{-8}$	5
^{129}I	$1,1 \times 10^{-7}$	1
^{131}I	$2,2 \times 10^{-8}$	6
^{134}Cs	$1,9 \times 10^{-8}$	7
^{137}Cs	$1,3 \times 10^{-8}$	10
^{210}Pb	$1,3 \times 10^{-6}$	0,1
^{210}Po	$6,2 \times 10^{-7}$	0,2
^{224}Ra	$8,0 \times 10^{-8}$	2
^{226}Ra	$2,2 \times 10^{-7}$	1
^{228}Ra	$2,7 \times 10^{-7}$	1
^{232}Th	$1,8 \times 10^{-6}$	0,1
^{234}U	$3,9 \times 10^{-8}$	4
^{238}U	$3,6 \times 10^{-8}$	4
^{239}Pu	$5,6 \times 10^{-7}$	0,3

[a] Pour le ^{40}K, voir fin du § 4.2, Pour le ^{222}Rn, voir section 4.2.3.

[b] Source : National Radiological Protection Board, *Committed equivalent organ doses and committed effective doses from intakes of radionuclides*. Chilton, Didcot, 1991.

Les directives précédentes recommandaient d'utiliser la valeur moyenne des activités globales alpha et bêta pour les contrôles de routine. Ces moyennes étaient fixées respectivement à 0,1 Bq/litre et 1 Bq/litre. Le tableau 9 indique les doses correspondant à ces niveaux d'activités globales alpha et bêta pour un certain nombre de radionucléides. Pour certains d'entre eux, comme le ^{226}Ra et le ^{90}Sr, la dose correspondante est bien inférieure à 0,1 mSv par an. On peut voir aussi sur ce tableau que si certains radionucléides comme le ^{232}Th, le ^{228}Ra ou le ^{210}Pb sont responsables à eux seuls d'une activité alpha globale de 0,1 Bq/litre ou d'une activité bêta globale de 1 Bq/litre, la dose de référence de 0,1 mSv par an sera dépassée. Toutefois, ces radionucléides ne représentent généralement qu'une petite fraction de l'activité globale. En outre, s'ils présentaient une activité volumique élevée, il en serait probablement de même pour d'autres radionucléides. Cela se traduirait par des activités globales alpha et bêta supérieures à la limite au-dessus de laquelle une enquête doit être entreprise et des analyses spécifiques devraient alors être effectuées. En conséquence, les valeurs limites recommandées pour le contrôle de l'eau de boisson, au-dessous desquelles aucune mesure supplémentaire n'est nécessaire, continuent d'être fixées à 0,1 Bq/litre pour la radioactivité globale alpha et 1 Bq/litre pour la radioactivité globale bêta.

Les méthodes normales d'analyse ne détectent pas les radionucléides émettant des particules bêta de faible énergie, comme le ^{3}H et le ^{14}C, ni certains éléments gazeux ou volatils comme le ^{222}Rn et le ^{131}I. Les valeurs indiquées pour les activités globales moyennes alpha et bêta ne concernent pas ces radionucléides de sorte que, si leur présence est soupçonnée, il faudra employer des techniques spéciales d'échantillonnage et de mesure.

Tableau 9. Exemples de doses résultant d'un an de consommation d'eau de boisson contenant l'un des émetteurs alpha ou bêta indiqués, avec une activité volumique de 0,1 Bq/litre ou 1 Bq/litre[a], respectivement

Radionucléide	Dose (mSv)
Émetteurs alpha (0,1 Bq/litre)	
^{210}Po	0,045
^{224}Ra	0,006
^{226}Ra	0,016
^{232}Th	0,130
^{234}U	0,003
^{238}U	0,003
^{239}Pu	0,04
Émetteurs bêta (1 Bq/litre)	
^{60}Co	0,005
^{89}Sr	0,003
^{90}Sr	0,020
^{129}I	0,080
^{131}I	0,016
^{134}Cs	0,014
^{137}Cs	0,009
^{210}Pb	0,95
^{228}Ra	0, 20

[a] Calculs effectués à l'aide des facteurs de conversion de dose publiés par le National Radiological Protection Board dans *Committed equivalent organ doses and committed -effective doses from intakes of radionuclides*, Chilton, Didcot, 1991.

Si l'activité volumique globale bêta approche ou dépasse 1 Bq/litre, cela ne veut pas nécessairement dire que la dose de référence a été dépassée. Cette situation peut en effet résulter de la présence de ^{40}K, qui constitue environ 0,01 % du potassium naturel. Le potassium est un élément essentiel apporté principalement par les aliments et dont l'absorption obéit aux mécanismes d'homéostasie. Ainsi, l'ingestion de ^{40}K, dont le facteur de conversion de dose est relativement faible (5×10^{-9} Sv/Bq), avec l'eau de boisson, contribue beaucoup moins à la dose totale que celle de nombreux autres émetteurs bêta. L'identification des différents radionucléides présents dans l'échantillon donnera une idée plus claire de la situation.

4.2.1 Méthodes d'analyse

L'Organisation internationale de Normalisation (ISO) a publié des méthodes normalisées de mesure de l'activité volumique globale alpha et de l'activité volumique globale bêta dans l'eau. Les niveaux recommandés pour ces activités doivent être supérieurs aux limites de détection, même si celles-ci dépendent des radionucléides présents, des solides dissous dans l'échantillon et des conditions de comptage. La limite de détection de l'ISO pour l'activité globale alpha exprimée en équivalent ^{239}Pu est de 0,04 Bq/litre, tandis que pour l'activité globale bêta, exprimée en équivalent ^{137}Cs, elle est comprise entre 0,04 et 0,1 Bq/litre.

Pour l'analyse des différents radionucléides présents dans l'eau de boisson, il existe des recueils généraux de méthodes, en plus des méthodes spécifiques publiés dans la littérature technique (voir bibliographie).

4.2.2 Stratégie d'évaluation de l'eau de boisson

Si l'activité volumique globale alpha dépasse 0,1 Bq/litre ou si l'activité volumique globale bêta dépasse 1 Bq/litre, il faut identifier les radionucléides responsables et mesurer l'activité volumique de chacun d'entre eux. A partir de ces données, il faut ensuite estimer une dose pour chaque radionucléide et déterminer la somme de ces doses. Si l'inégalité suivante est respectée, aucune autre mesure ne s'impose

$$\sum i \frac{Ci}{RCi} \leq 1$$

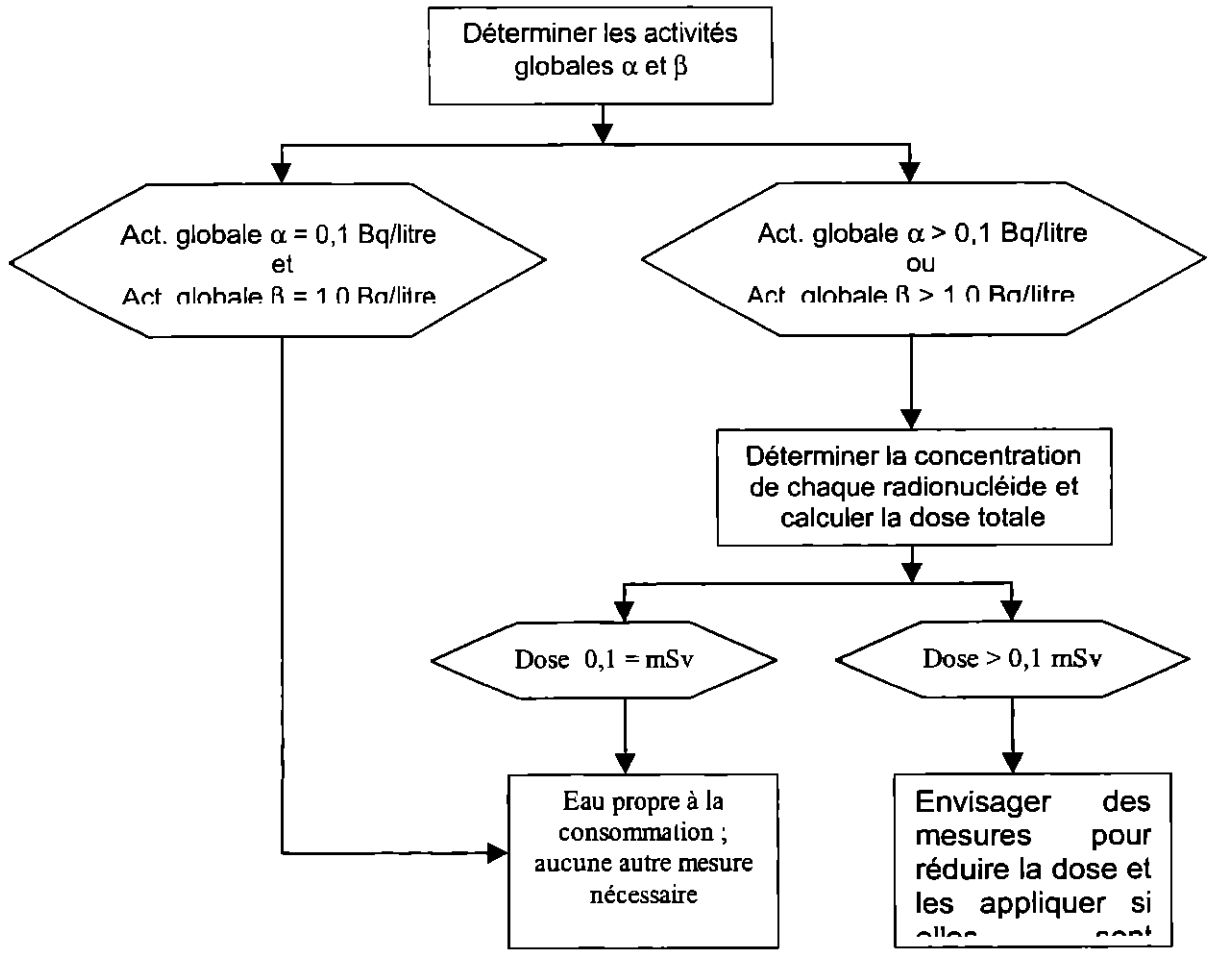
où Ci est l'activité volumique mesurée du radionucléide i et RCi l'activité volumique de référence du radionucléide i correspondant à une dose effective engagée de 0,1 mSv pour une consommation de deux litres d'eau par jour pendant un an (voir tableau 8).

- Si l'on soupçonne la présence de radionucléides émetteurs alpha pour lesquels le facteur de conversion de dose est élevé, on peut également utiliser cette formule lorsque les activités globales alpha et bêta se rapprochent des limites de 0,1 Bq/litre et 1 Bq/litre. Si la somme dépasse l'unité pour un seul échantillon, la dose de référence de 0,1 mSv ne sera dépassée que si l'exposition à ces mêmes concentrations se poursuit pendant une année entière. Par conséquent, un tel résultat ne signifie pas que l'eau est impropre à la consommation, mais

seulement que l'évaluation doit être poussée plus loin, en procédant au besoin à des prélèvements supplémentaires.

L'autorité compétente doit alors examiner les moyens qui s'offrent à elle pour réduire la dose. Si des mesures correctives sont envisagées, toute stratégie susceptible d'être retenue devra d'abord être justifiée (autrement dit, elle doit produire un avantage net) puis optimisée conformément aux recommandations de la CIPR, de façon à ce que cet avantage soit maximal. L'application de ces recommandations est schématisé à la figure 1.

Figure 1. Application des recommandations relatives aux radionucléides dans l'eau de boisson sur la base d'une dose annuelle de référence de 0,1 mSv



4.2.3 Radon

Le calcul de l'activité volumique du ^{222}Rn dans l'eau de boisson par la méthode de la dose de référence présente des difficultés en raison de la facilité avec laquelle le radon s'échappe de l'eau au cours des manipulations et de l'importance de l'inhalation comme voie d'absorption. L'agitation et le transvasement de l'eau d'un récipient dans un autre libère le radon dissous. Si l'eau est laissée au repos un certain temps, l'activité du radon diminue et l'ébullition l'élimine complètement. Il est donc important de tenir compte de la forme sous laquelle se présente l'eau consommée lors de l'évaluation de la dose absorbée par ingestion. En outre, l'utilisation de l'eau pour d'autres usages domestiques augmentera la concentration de radon dans l'air et, par conséquent, la dose

absorbée par inhalation. Cette dose dépend beaucoup de la forme sous laquelle l'eau est absorbée, des usages domestiques qui en sont faits et du mode de construction des habitations, toutes caractéristiques qui varient largement d'une région du monde à l'autre. Il est donc impossible de calculer une activité volumique pour le radon dans l'eau de boisson qui soit d'application universelle.

A l'échelle mondiale, la dose moyenne absorbée par inhalation du radon de toutes origines est d'environ 1 mSv/année, ce qui est à peu près la moitié de l'exposition totale au rayonnement naturel. Par comparaison, la dose provenant de l'ingestion du radon présent dans l'eau de boisson est relativement faible. Toutefois, dans certaines situations particulières, les risques dus à l'inhalation et à l'ingestion peuvent être à peu près équivalents. Cela explique que l'ingestion ne puisse être considérée indépendamment de l'inhalation comme source d'exposition, d'autant plus que la présence de radon dans les habitations peut avoir d'autres origines.

Les autorités compétentes doivent évaluer tous ces facteurs à l'échelon régional ou national afin de déterminer si un niveau de référence de 0,1 mSv convient pour la région en question et fixer une activité volumique qui pourra servir de guide pour juger de la qualité de l'approvisionnement en eau. Ces jugements devront être fondés non seulement sur l'exposition par ingestion et inhalation du radon contenu dans l'eau, mais aussi sur l'exposition à d'autres sources de radon susceptible d'être inhalé. Dans ces circonstances, il semble nécessaire d'adopter une approche intégrée et d'évaluer les doses apportées par toutes les sources de radon, en vue notamment de déterminer les mesures optimales à appliquer si cela s'avère indispensable.

Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie

Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

Contexte environnemental

Note technique n° 16

Octobre 1999

DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

RESUME

Assurer une gestion durable des eaux minérales signifie la mise en œuvre de tous les moyens disponibles pour maintenir la stabilité de la qualité des eaux exploitées et leur absence de contamination bactériologique et/ou chimique.

L'évaluation de la protection naturelle des sites d'exploitation d'eau minérale nécessite de bien connaître le contexte environnemental de ces sites.

La présente note technique a pour objet de présenter d'une part les critères utilisés pour caractériser la protection des eaux souterraines, d'autre part les risques existants, et enfin les éléments à prendre en compte dans l'analyse d'un contexte environnemental.

Si la protection de chaque site reste liée à son contexte particulier (hydrogéologique, hydraulique et humain) il n'en demeure pas moins que certaines grandes lignes restent communes, on peut citer :

- la nécessité d'une définition rigoureuse des conditions d'exploitation et le respect de ces conditions dans le temps, nécessaire au maintien des équilibres hydrauliques,

- la nécessité d'une connaissance précise des zones de circulation de l'eau minérale, depuis les secteurs d'alimentation du gisement, indispensable pour assurer un développement raisonné des activités,

- la nécessité d'un suivi des exploitations (à l'émergence et éventuellement en certains points particuliers du gisement) indispensable pour anticiper sur d'éventuels désordres et permettre les actions correctives.

- *la nécessité d'un suivi de l'évolution du contexte environnemental.*

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 1

2. DEMARCHES VISANT A RENFORCER LA PROTECTION DES EAUX MINERALES . 1

3. GENERALITES SUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES 3

4. ANALYSE DES RISQUES EN HYDROGEOLOGIE 4

5. ELEMENTS D'ANALYSE DU CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL 6

6. CONCLUSION 8

Annexes :

1. Eléments constitutifs d'un dossier de déclaration d'intérêt public et de demande d'instauration de périmètre de protection (selon projet à l'étude).

2. Liste de facteurs susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines d'un site.

1. INTRODUCTION

Si une eau minérale naturelle est par définition « naturellement protégée », il n'en demeure pas moins que les conditions de son exploitation, à l'émergence et au sein d'un gisement donné, sont fonction des relations qui existent entre les zones de circulations de l'eau minérale et l'extérieur. Ainsi, la qualité physico-chimique d'une eau minérale, qui se doit d'être stable dans le temps, dépend du contexte environnemental dans lequel se situe le système concerné.

On entend ici par « système » l'ensemble des domaines qui caractérisent la circulation d'une eau minérale (zone d'alimentation, zone de circulation et d'acquisition de la minéralisation, zone d'émergence).

Il existe des moyens réglementaires qui visent à renforcer la protection des eaux minérales cependant la mise en œuvre de ces moyens nécessite, pour être efficace, d'analyser et de comprendre au mieux les phénomènes susceptibles d'interférer sur la qualité des eaux à protéger.

Il s'agit donc de définir le contexte environnemental pour juger de la protection de tel ou tel système et orienter en conséquence les actions à entreprendre pour assurer une gestion durable de la ressource.

Après une présentation succincte des moyens réglementaires actuellement disponibles pour préserver la protection des eaux minérales, la présente note technique expose l'ensemble des aspects à prendre en compte dans l'analyse d'un contexte environnemental. Cette note a pour objet de sensibiliser globalement le lecteur sur le contexte environnemental en sachant cependant que chaque site présente un contexte hydrogéologique qui lui est propre, et qu'il sera, à l'évidence, toujours nécessaire d'adapter l'analyse d'un contexte environnemental à chaque cas particulier.

2. DEMARCHES VISANT A RENFORCER LA PROTECTION DES EAUX MINERALES

On peut considérer qu'il existe deux niveaux pour la mise en œuvre des protections d'une eau minérale :
- ↪ Les moyens réglementaires,
- ↪ Les moyens consensuels.

→ LES MOYENS REGLEMENTAIRES

Concernant les moyens réglementaires, on est amené à distinguer deux niveaux selon que l'on considère la réglementation "eau minérale" proprement dite ou les réglementations plus générales sur l'eau et/ou l'occupation du sol :

- Dans le cadre de la réglementation eau minérale, il existe deux types de dispositif réglementaire, le **Périmètre Sanitaire d'Emergence** (PSE), délimité lors des demandes d'autorisation d'exploiter à l'émergence au titre du décret de 1957 et le **périmètre de protection** *institué au titre de la procédure de* DIP/DPP([1]) *dans le* cadre des articles L735 et suivants du Code de la Santé Publique.

Le PSE définit un niveau de protection à proximité immédiate des émergences ([2]).
Le décret instituant un périmètre de protection (DPP) permet la définition de protections sur des étendues importantes, avec mise en place de contraintes associées. La procédure de DIP/DPP, ancienne et peu utilisée au cours des dernières décennies, devrait faire l'objet d'une mise à jour réglementaire prochaine afin de permettre de relancer une procédure devenue obsolète, sur la base d'un contexte environnemental qui a bien évidemment fortement évolué depuis le siècle dernier. A titre d'information l'annexe 1 présente les éléments constitutifs d'un dossier de demande d'instauration de périmètre de protection (une telle demande est subordonnée à l'attribution d'une DIP, les deux demandes (DIP et DPP) n'étant cependant pas nécessairement présentées simultanément).

NOTA 1 : La définition de contraintes au titre des périmètres de protection des eaux minérales se heurte au caractère privé des exploitations (à la différence des Alimentations en Eau Potable = AEP). C'est pourquoi la notion d'intérêt public est nécessaire pour justifier la démarche.

NOTA 2 : La Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales a établi début 99 un atlas des périmètres de protection existant dans le domaine des eaux minérales (cf. référence bibliographique). On dénombre en France 38 sites bénéficiant de périmètre de protection. Cependant il apparaît que pour la majorité d'entre eux les critères d'ordre hydrogéologique n'ont pas prévalu à la définition des secteurs à protéger et qu'en conséquence des révisions seraient utiles.

La procédure d'instauration de périmètre de protection nécessite, au titre de l'article L735 du Code de la Santé Publique, la mise à enquête selon les conditions définies par le décret du 08/09/1856. Le dossier soumis à l'enquête doit détailler l'ensemble des contraintes qu'il est envisagé d'imposer. Les contraintes peuvent concerner toutes les activités ou faits susceptibles d'altérer l'environnement. On conçoit que, s'agissant de réduire des libertés individuelles pour les propriétaires concernés par le périmètre à instaurer, la caractérisation des contraintes retenues se doit d'être dûment justifiée.

- Dans le cadre des réglementations plus générales sur l'eau et/ou l'occupation du sol il convient de citer l'utilisation possible de dispositions particulières, non directement liées à la réglementation des eaux minérales, qui permettent de renforcer la protection des sources d'eau minérale.

En premier lieu on se doit de citer la Loi sur l'Eau qui permet de renforcer globalement la protection de la ressource en eau souterraine (les eaux minérales font partie des eaux souterraines) de part la classification des opérations soumises à déclaration et/ou autorisation. On notera cependant que seule la définition de périmètre de protection, au titre de l'eau minérale, permet de renforcer les dispositions réglementaires envisageables au titre de la Loi sur l'Eau.

---

[1] DIP/DPP = Déclaration d'Intérêt Public / Décret instituant un Périmètre de Protection.
[2] Voir note technique DNEMT N°6.

En second lieu on citera la possibilité dont disposent les communes d'instaurer des contraintes liées au sol dans le cadre de la définition des Plans d'Occupation des Sols (POS). Soucieuses de protéger les sources d'eau minérale de leur territoire, certaines communes ont parfois utilisé le POS pour maîtriser le développement d'activité et de l'urbanisme en particulier dans le secteur proche des émergences.

Les deux aspects réglementaires évoqués ci-dessus (Loi sur l'Eau et POS), qui induisent des procédures initiées au niveau départemental, constituent, il convient d'en convenir, des *artefacts réglementaires* (par rapport au caractère eau minérale proprement dit de la ressource). Ils peuvent cependant être mis en œuvre avec plus de facilité en comparaison avec la procédure très complexe de DIP/DPP qui nécessite un avis du Conseil d'Etat.

On notera cependant *que seule la procédure de DIP/DPP constitue une réelle garantie que* l'intérêt public sera préservé sur le long terme d'une part et sur les possibilités de développement de la ressource (donc de l'activité économique) d'autre part étant entendu qu'un exploitant acquière un droit d'exécuter des forages complémentaires d'exploitation sur des terrains qui ne lui appartiennent pas.

NOTA : La définition de dispositions particulières de protection, telle qu'évoquées ci-dessus (notamment le POS), peut probablement constituer un élément favorable lors de la présentation d'une demande de DIP/DPP si l'on considère que les actions engagées par la collectivité prouvent une prise de conscience déjà affirmée de la nécessité d'assurer une meilleure protection de l'eau minérale sur un site donné.

→ LES MOYENS CONSENSUELS

Il peut paraître étonnant de considérer que la protection d'un gisement d'eau minérale puisse être assurée par des moyens consensuels. Cependant force est de constater que la mise en œuvre de protection sur des bases réglementaires strictes est nécessairement très délicate, tout simplement parce que les intérêts de ceux qui utilisent la source d'eau minérale et de ceux qui utilisent les terrains à protéger ne sont pas forcément convergents. Ainsi on voit se développer sur les sites des grands minéraliers des stratégies de concertation entre industriels et propriétaires (ou exploitants du sol) dont la finalité est d'établir des accords (intégrant une dimension financière) qui permettent à chaque partie de maintenir son activité avec le souci collectif de préserver l'environnement.

On ne peut donc pas négliger ces moyens dits consensuels car ils ont prouvé leur efficacité sur différents sites et méritent ainsi, semble-t-il, une appréciation positive.

3. GENERALITES SUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES

Plusieurs critères sont utilisés, dans le cadre général des eaux souterraines, pour caractériser la protection d'un site d'exploitation.

On peut citer :

→ **Le pouvoir épurateur** ([3]) du sol et du sous sol et en particulier de la zone non saturée qui peut jouer un rôle d'auto-épuration, en fonction des vitesses de transit, notamment pour l'aspect bactériologique. Dans le cas des exploitations d'eau minérale, le rôle joué par l'auto-épuration devra être considéré avec beaucoup de précaution quant on sait que l'eau minérale doit être naturellement saine à l'émergence.

→ **Le rabattement**, propre aux ouvrages en pompage, qui modifie un équilibre hydraulique naturel et peut induire dans la zone d'appel (zone influencée par la mise en exploitation) la mise en communication de nappes différentes sous l'effet des modifications de leurs pressions hydrauliques relatives. Ce critère est extrêmement important dans le cas des eaux minérales si l'on se réfère à la nécessité d'assurer la stabilité de la qualité d'une eau minérale dans le temps. Toute modification d'un schéma hydraulique naturel peut se traduire à moyen ou long terme, par des variations (parfois irréversibles) de la qualité. C'est pourquoi les essais à réaliser en vue d'obtenir une autorisation d'exploiter à l'émergence sont nécessairement d'autant plus long (6 mois voire une année hydrologique) que les modifications de l'écoulement naturel sont grandes. Ces aspects justifient également le fait que l'on conseille fortement, dans certains cas, de ne pas exploiter au delà de l'artésianisme naturel ou tout au moins de maintenir un artésianisme naturel sur des sources situées à proximité d'un ouvrage de captage en exploitation.

→ **Le temps de transfert**, qui définit le temps qu'il faut à une molécule d'eau pour transiter depuis l'origine (précipitation) jusqu'au point d'exhaure. Ce critère permet, à priori, de relativiser l'importance des dispositifs de protection à retenir.

→ Sachant, en effet, que l'on dispose de moyens de datation de l'eau (^{3}H, ^{14}C...) on peut être tenté de raisonner de manière distincte selon que l'on considère des temps très longs ou non. Pour des âges importants (> 100 ans et plus) on est parfois tenté de considérer qu'une protection naturelle liée au temps de transfert existe. Pour des âges moins importants (quelques dizaines d'années, voire beaucoup moins) on ne néglige généralement pas le fait qu'une molécule d'eau peut véhiculer des polluants et on prend alors systématiquement en considération l'analyse du "système" dans sa globalité.

Cependant s'agissant de la nécessité d'assurer une gestion *durable* de la ressource, on peut s'interroger sur la validité d'une limitation dans le temps. Le terme de "durable" nécessite en toute logique de développer un raisonnement sur le long terme.

→ **La distance** qui caractérise l'éloignement relatif entre un ouvrage de captage et une zone d'alimentation, est un critère très subjectif pour limiter une zone de protection car il ne tient pas compte des processus d'écoulement. Dans le cas des eaux minérales en particulier, la délimitation de zone de protection basée sur la simple distance (certains périmètres de protection anciens sont définis par un cercle de 500 m autour de la source[4]) ne saurait être considérée comme scientifiquement valable.

→ **Les limites d'écoulement**, qui consistent à utiliser les caractéristiques physiques, topographiques ou hydrogéologiques qui contrôlent l'écoulement, pour définir l'ensemble du système de circulation de l'eau depuis la zone d'alimentation jusqu'à la zone d'émergence. Ce critère est le plus exhaustif en terme de protection. Il ne doit cependant pas forcément être considéré comme le seul réellement valable car si les zones d'alimentation et d'émergence méritent souvent une attention particulière, certaines zones de circulation profondes ne nécessitent pas de protection spéciale en surface.

---

[3] pouvoir épurateur = faculté d'assurer une épuration naturelle (biodégradation)

[4] Ces dispositions avaient souvent été prises pour éviter des exploitations concurrentielles.

4. ANALYSE DES RISQUES

Tout système aquifère, d'eau minérale ou d'eau de source, (ensemble du circuit souterrain compris entre la zone d'alimentation et le point d'émergence naturelle initial) a pour caractéristique de devoir être exploité un jour et/ou de voir son exploitation se développer. Il est de plus intégré dans un ensemble global de processus d'intensification de l'occupation des sols.

Le développement de l'activité a pour conséquences :

- une urbanisation et une industrialisation croissantes de l'environnement de la source ;
- une multiplication des points de captage et une complexité croissante de la gestion hydraulique du gisement et du mode d'exploitation.

Tout système se situe donc sur une portion de territoire dont l'environnement va évoluer dans le temps (activités humaines diverses).

En relation avec les évolutions évoquées ci-dessus, deux types de risques peuvent être distingués :

- risques « externes » (liés à l'environnement du gisement ou de la source exploitée) ;
- risques « internes » (liés à l'exploitation).

Ces risques peuvent exercer leurs impacts sur quatre paramètres objectifs du fluide exploité :

→ **LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU :**

- *Pollution occasionnelle* :
  - causes possibles : Externe : { environnement ; acte malveillant }
    Interne : { incident d'exploitation ; incident de chantier }
- *Altération répétitive ou chronique* :
  Externe : { dérive progressive de la chimie liée à une évolution du gisement ou de l'environnement (zone d'alimentation) }
  Interne : { surexploitation du gisement (effet d'appel à des eaux de qualités différentes), dégradation des conditions d'exploitation (interaction de l'eau et des matériaux avec lesquels elle est en contact) ; interférences entre captages }

→ **LA QUALITE BACTERIOLOGIQUE DE L'EAU :**

- *Pollution accidentelle* : même causes que pour la chimie
- *Pollution chronique* : évolution de l'environnement, surexploitation du gisement, pollution « remontante » à partir du bâtiment d'exploitation

→ **LE DEBIT D'EAU :**

- *Ouvrage de captage* : vieillissement (colmatage ...), surexploitation, interférences entre captages
- *Gisement* : surexploitation, variations climatiques ...

→ **LE DEBIT DE GAZ ASSOCIE :**

- Evolution naturelle du gisement
- Surexploitation d'un ouvrage, interférences entre captages
- Surexploitation du gisement

A l'exception de la catastrophe naturelle, de l'acte de malveillance (toujours possible quelles que soient les précautions prises), d'une dégradation progressive et généralisée de l'environnement (dans certains cas), une minimisation des risques est possible, dans des proportions importantes, moyennant :

- une bonne connaissance du gisement,
- des conditions de captage correctes (forage ou captage effectué dans les règles de l'art),
- des installations de surface bien conçues et adaptées au chimisme particulier de l'eau,
- un schéma d'exploitation rationnel, couplé à un suivi d'exploitation rigoureux,
- l'observation de règles d'hygiène strictes au niveau des bâtiments d'exploitation.

5. ELEMENTS D'ANALYSE DU CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Compte tenu des points évoqués précédemment, il ressort qu'analyser le contexte environnemental d'un site revient à disposer de toutes les informations utiles sur les 3 points suivants :

1. la vulnérabilité naturelle du gisement, inhérente à sa nature (environnement hydrogéologique du système aquifère considéré),
2. l'incidence de l'environnement urbain, industriel ou agricole,
3. l'incidence des conditions d'exploitation du gisement.

Le degré de vulnérabilité d'un gisement peut en général être considéré comme une constante ; par contre l'environnement et les conditions d'exploitation constituent deux paramètres éminemment évolutifs qui peuvent avoir une incidence sur le degré de vulnérabilité du gisement.

Les éléments d'analyses à considérer pour l'étude d'un site, et qui donc en toute logique doivent figurer dans un dossier de demande d'instauration de protection sont les suivantes :

→ LE CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

- *Nature géologique du réservoir* (identification de la formation géologique dans laquelle est captée l'eau) : la nature de la roche a une incidence fondamentale sur la qualité et la vulnérabilité des ressources en eau.

Quelques exemples :

  - roche cristalline (granite, gneiss) : perméabilité de fissures, ressources ponctuelles, potentiel de développement difficile à évaluer, vulnérabilité à la pollution extrêmement variable ;

  - roche calcaire, suivant qu'elle est karstifiée ou non, ressource pouvant être extrêmement importante, mais filtration plutôt faible, circuits souterrains parfois extrêmement rapides, et vulnérabilité parfois importante ;
  - sables ou grès, milieux poreux : bonne filtration, possibilités de développement intéressantes.

- *Structure géologique* : elle conditionne également la qualité du gisement : structures planes, plissées, fracturées (failles, etc...). En relation avec la topographie, elle conditionne l'existence des émergences naturelles et la rapidité des circuits souterrains.

- *Série géologique* : quelles sont la nature et les épaisseurs des couches géologiques qui encadrent le réservoir ? Appréciation en termes de perméabilité et d'imperméabilité (existence d'écrans étanches à une pollution entre la surface et le réservoir : évaluation de la vulnérabilité naturelle du gisement.

- *Bassin d'alimentation* : extension, situation et altitude de la zone d'alimentation ; incidence sur les risques de pollution.

- *Précipitations* : les données concernant le bassin d'alimentation sont particulièrement intéressantes à exploiter. (incidence des périodes de recharge sur la chimie et sur le régime hydraulique)

→ LE CONTEXTE HYDRAULIQUE

- *équipement des ouvrages de captages* (pompes et tête d'ouvrage) : évaluation des dispositifs de protection de l'émergence et de suivi des paramètres de l'exploitation (débit, pression, qualité). Quelles précautions ont été prises pour assurer une gestion durable de la ressource ?

- *modalité d'exploitation* : condition de fixation du débit d'exploitation et du rythme envisagé (continu, alternatif), incidence sur les ouvrages voisins, rabattement, variations en fonction des situations de recharge de la nappe, incidence sur les nappes adjacentes.

→ **LE CONTEXTE GEOCHIMIQUE**

- appréciation de ce qui, le cas échéant, différencie l'eau minérale à protéger de son environnement hydrogéologique (c'est-à-dire d'une eau de nappe « banale »), en termes de composition chimique (y compris si possible radioactivité naturelle et isotopes stables, deutérium, oxygène 18 et tritium, de l'eau considérée), et également en termes de bactériologie et de débit.

- caractérisation de ces paramètres, pour la ressource considérée ainsi que pour tous les points d'eau représentatifs de l'environnement hydrogéologique de cette ressource (afin de pouvoir comparer et différencier les différentes ressources en eau).

NOTA : *On accordera une attention particulière au contrôle de la fiabilité de ces données, et donc à la vérification détaillée des conditions et méthodes de prélèvement et de conditionnement des échantillons, des méthodes d'analyse et des mesures utilisées (en comparant au besoin les données d'analyses issues de contrôles réglementaires, des suivis particuliers réalisés par les exploitations et éventuellement d'archives).*

→ **LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HUMAIN**

- topographie et géographie (position relative du site),

- couverture et occupation des sols : analyse aussi précise que possible du type d'agriculture et/ou d'élevage pratiqué, mode cultural,

- degré d'urbanisation et système d'assainissement existant (y compris parc de loisir, cimetières, camping, décharges),

- caractérisation des activités industrielles existantes (y compris mines et carrières),

- réseau de transports (route, rail, gazoduc, oléoduc, y compris aire de stationnement et stockage, station service),

- qualité des plans d'eau ou cours d'eau voisins.

L'analyse de l'activité humaine (agriculture, élevage ou industrie) dans le secteur considéré devra porter sur le passé (exemple : rémanence parfois très longue de certains produits phytosanitaires utilisés en agriculture) sur le présent et sur les projets de développements.

NOTA : *Une analyse du contexte historique d'un site d'exploitation peut apporter des informations très intéressantes sur le contexte global de protection. La trace de problèmes passés et les moyens de les résoudre, l'analyse des données pluviométriques en regard des débits et niveaux mesurés ou encore des chroniques d'analyses de chimie ou de bactériologie peuvent apporter des indications sur l'existant et orienter les démarches pour assurer une meilleure protection.*

A titre d'information l'annexe 2 présente une liste indicative de facteurs susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines d'un site. Cette liste a pour objet d'aider à l'analyse environnementale pour orienter les actions à engager en vue d'assurer la protection d'un site.

6. CONCLUSION

L'analyse du contexte environnemental d'un site d'exploitation d'eau minérale, pour en assurer une protection efficace, nécessite d'identifier les risques inhérents à la qualité de l'eau dans un contexte hydrogéologique particulier, soumis à des contraintes d'exploitation spécifiques, dans un environnement géographique et humain qui lui est propre.

Les risques étant identifiés, la gestion durable d'une ressource en eau minérale peut nécessiter des actions particulières telles que :

- la limitation de l'exploitation,
- la maîtrise des activités susceptibles d'entraîner des nuisances,
- la mise en conformité d'installations diverses (réseau...)
- la mise en œuvre de pratique culturale appropriée.

Les modalités pratiques de mise en œuvre de contraintes pour assurer la protection d'une ressource, encadrées par des dispositions réglementaires spécifiques aux eaux minérales, nécessitent souvent, pour une efficacité optimale, qu'une concertation étroite s'établisse entre utilisateurs de la ressource d'eau minérale et utilisateurs des terrains concernés par la protection.

Dans tous les cas, cette gestion durable nécessite d'une part une connaissance approfondie du site, d'autre part une analyse très détaillée des activités susceptibles de modifier l'environnement. Enfin il est indispensable d'encourager non seulement un suivi de l'exploitation (au minimum à l'émergence) pour anticiper sur d'éventuels désordres et permettre de prendre les mesures correctives qui pourraient s'imposer mais encore un suivi de l'évolution du contexte environnemental lui même.

BIBLIOGRAPHIE

1999 : "Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine" – Editions BRGM – Série Manuels & Méthodes – Andrée LALLEMAND-BARRES et Jean-Claude ROUX.

1999 : "Atlas des périmètres de protection des sources d'eau minérale" – Rapport BRGM R40466 – avril 99 – Philippe VIGOUROUX.

Annexe 1

Eléments constitutifs d'un dossier
de déclaration d'Intérêt Public et de demande
d'instauration de périmètre de protection
(selon projet à l'étude)

Un dossier de demande déclaration d'intérêt public et d'instauration de périmètre de protection comprend les pièces suivantes :

➥ **DECLARATION D'INTERET PUBLIC** :

1. Demande proprement dite indiquant :

1.1 Les nom, prénoms, domicile, qualité et nationalité du propriétaire de la source ou de l'exploitant agissant en son nom ou, si la demande est faite au nom d'une société, la raison sociale, la forme juridique et le siège social de celle-ci ainsi que les nom, prénoms, qualité et nationalité du mandataire chargé de présenter la demande.
1.2 Les noms de la source et de ses émergences.
1.3 Le nom de la commune et le cas échéant, du lieu-dit où sont situées la source et les installations servant à l'exploitation de l'eau.

2. Une note de présentation justifiant la demande et comportant une synthèse des éléments du dossier.

3. Des annexes comportant :

3.1 Les copies des actes administratifs relatifs à la source.
3.2 Des documents cartographiques au 1/100 000 et 1/25 000 donnant la situation de la source et des installations d'exploitation.
3.3 Une note synthétique faisant état du régime d'exploitation et des caractéristiques de l'eau de la source, et de leur stabilité en replaçant ces éléments dans le contexte historique.
3.4 Un mémoire exposant les motifs de la demande en mettant l'accent sur la valeur patrimoniale de la source et de l'impact économique de son exploitation pour la collectivité.
3.5 Une note sur la protection sanitaire de la source et sur les dispositifs de surveillance mis en œuvre.
3.6 Un descriptif détaillé des installations d'exploitation avec plans à l'appui.

➥ **PIECES SPECIFIQUES A LA DEMANDE D'INSTAURATION D'UN PERIMETRE DE PROTECTION** ([5])

1. Un plan à une échelle adaptée à l'importance de la surface du périmètre, avec indication des limites de celui-ci. Doivent y figurer les dépôts, installations et activités susceptibles d'avoir un impact sur la qualité de l'eau minérale.

2. Une étude hydrogéologique justifiant le périmètre de protection sollicité et comprenant une interprétation des structures géologiques, de la circulation des eaux et le cas échéant des gaz, ainsi qu'une analyse de la qualité de la protection naturelle du gisement et de sa vulnérabilité.

3. Une note de présentation des servitudes et contraintes susceptibles d'être imposées aux installations, dépôts et activités, accompagnée d'un mémoire justificatif.

4. Une note justifiant l'établissement des zones mentionnées au § 1 ci-dessus et énumérant les travaux, dépôts, installations et activités que le pétitionnaire souhaite soumettre à autorisation ou déclaration administrative préalable.

[5] Pour le cas où les deux demandes DIP et DPP sont disjointes, la demande d'instauration d'un périmètre de protection doit comporter les pièces de la DIP.

Annexe 2

Liste de facteurs susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines d'un site

Liste de facteurs susceptibles d'avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines d'un site

(liste non exhaustive)

Faits ou activités susceptibles de provoquer des pollutions ponctuelles ou diffuses des eaux souterraines :

- installations industrielles (dont établissements classés, en considérant cependant que ces derniers ont fait l'objet de procédures d'analyse des risques et de dispositions particulières de prévention des pollutions),
- réseaux et infrastructures de transport : route, voies ferrées, aéroport, aires de stationnement, aires d'entretien (salage),
- activités liées à la présence ou au développement de la population (réseau d'assainissement, cimetières),
- dépôts, même temporaires, d'ordures ménagères, d'immondices, de résidus agricoles ou industriels, de produits radioactifs et de toute matière susceptible d'altérer la qualité des eaux,
- épandage et rejet superficiel ou souterrain d'eaux usées, d'origine ménagère, industrielle ou agricole, ainsi que les boues des stations d'épuration,
- rejets sur le sol ou dans le sous-sol des hydrocarbures, lubrifiants, et produits chimiques, ainsi que l'abandon et le rinçage des emballages, fûts, bidons ou citernes, ayant contenu ces produits,
- installation d'hydrocarbures ou de produits chimiques : dépôts, réservoir (cuve enterrée), canalisations,
- dépôts de fumier et de matières fermentescibles (ensilage),
- épandages de lisiers, fumures liquides et de produits phytosanitaires ou assimilées,
- pratique de culture et de sylviculture intensive,
- mise en place d'abreuvoirs et de mangeoires,
- pacage intensif et stationnement prolongé des animaux,
- élevages de toute nature et parcs à gibier,
- parcs de loisirs, camping et stationnement des caravanes.
- travaux agricoles et jardinage sur les parcelles en cours d'exploitation (appréciation de l'application d'un code de bonnes pratiques culturales, avec des épandages de fertilisants strictement limités aux besoins des plantes et judicieusement échelonnés).

Faits ou activités susceptibles de favoriser l'infiltration rapide des eaux pluviales et de ruissellement :

- excavations de toute nature, ouverture de carrières et exploitation des matériaux du sol et du sous-sol,
- creusement de puits, forages ou captages de source et exploitation des eaux souterraines,
- création de retenues d'eau,
- création de chemins d'exploitation agricole entaillant le sol naturel,
- dessouchage et défonçage des haies et des parcelles boisées.