

**ENSP**

ECOLE NATIONALE DE  
LA SANTÉ PUBLIQUE

**RENNES**

---

**Ingénieurs du Génie Sanitaire**

**Promotion 2005**

---

***ATELIER SANTÉ ENVIRONNEMENT***

**EVALUATION ET GESTION DE  
L'EXPOSITION AU BARYUM**

---

**Sabine HOST**

**Denis KRAKOWIAK**

**Maxime ELLUIN**

---

# Remerciements

---

Nous tenons à remercier Cécile Brouillard, IGS à la DDASS des Vosges, de nous avoir confié ce travail et pour sa coopération.

Nous remercions également Laurent Grimault (AFSSA) et Alban Robin (DGS) pour leurs contributions.

Enfin nous remercions Jean Carré pour ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité.

---

# Sommaire

---

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1 LE BARYUM.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Généralités.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Propriétés physico-chimiques.....	3
1.1.2 Composés chimiques du baryum.....	4
1.1.3 Méthodes analytiques.....	4
<b>1.2 Cycle du baryum dans l'environnement.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Etat naturel.....	6
1.2.2 Exploitation minière.....	6
1.2.3 Usages industriels.....	7
1.2.4 Usages agricoles.....	8
1.2.5 Usages domestiques.....	8
1.2.6 Usage médical.....	8
1.2.7 Rejets dans l'environnement.....	8
1.2.8 Devenir dans l'environnement.....	8
<b>1.3 Teneurs dans l'environnement et les médias d'exposition pour l'homme. .</b>	<b>10</b>
1.3.1 Teneurs dans l'air.....	10
1.3.2 Teneurs dans les sols.....	10
1.3.3 Teneurs dans les eaux.....	11
1.3.4 Teneurs dans les aliments.....	14
<b>2 CARACTERISATION DES DANGERS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Toxicocinétique du baryum.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Incorporation et absorption.....	15
2.1.2 Distribution dans l'organisme.....	15
2.1.3 Métabolisme.....	15
2.1.4 Excrétion.....	16
<b>2.2 Mode d'action – Toxicité générale.....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Effets membranaires.....	16
2.2.2 Effets cellulaires généraux.....	16
2.2.3 Effets sur les muscles.....	16
2.2.4 Effets cardiaques.....	16

2.2.5	Effets sur l'estomac .....	17
2.2.6	Effets sur la sécrétion biliaire .....	17
2.2.7	Effets sur les métabolismes .....	17
<b>2.3</b>	<b>Toxicologie par voie orale .....</b>	<b>17</b>
2.3.1	Effets sur les animaux de laboratoire.....	17
2.3.2	Effets sur la santé humaine.....	19
<b>2.4</b>	<b>Toxicologie par voie respiratoire .....</b>	<b>20</b>
2.4.1	Exposition aiguë .....	20
2.4.2	Exposition chronique .....	21
<b>2.5</b>	<b>Résumé des effets cliniques.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Relation dose/réponse – Valeurs Toxicologiques de Référence .....</b>	<b>22</b>
2.6.1	Démarche générale de détermination des VTR .....	22
2.6.2	Recensement des effets critiques.....	23
2.6.3	Détermination des VTR .....	23
<b>3</b>	<b>EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Evaluation de l'exposition des populations.....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Apport par l'eau .....	26
3.1.2	Autres sources d'apports.....	27
3.1.3	Scénarios d'exposition .....	30
<b>3.2</b>	<b>Caractérisation du risque .....</b>	<b>30</b>
3.2.1	Méthodologie .....	31
3.2.2	Scénarios « Consommateurs d'eau moyen ».....	32
3.2.3	Scénarios « Fort consommateurs d'eau » .....	33
3.2.4	Bilan des différents scénarios .....	35
3.2.5	Analyse de sensibilité .....	35
<b>3.3</b>	<b>Analyse des incertitudes.....</b>	<b>37</b>
3.3.1	Incertitudes sur la détermination des valeurs toxicologiques de référence.....	37
3.3.2	Incertitudes sur les scénarios d'expositions .....	39
<b>3.4</b>	<b>Discussion – Commentaires.....</b>	<b>39</b>
3.4.1	Comparaison à une autre évaluation des risques sanitaires .....	39
3.4.2	Commentaires sur les valeurs toxicologiques de référence.....	40
3.4.3	Amélioration de la connaissance sur les apports alimentaires .....	40
<b>4</b>	<b>RECOMMANDATIONS – GESTION DU RISQUE.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Mesures de prévention.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Mesures visant à réduire l'exposition.....</b>	<b>41</b>

4.2.1	Elimination du baryum .....	41
4.2.2	Mélange avec une ressource à faible teneur .....	44
4.2.3	Abandon de la ressource.....	44
<b>4.3</b>	<b>Protocole de gestion .....</b>	<b>44</b>
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>47</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>		<b>- 49 -</b>

## Liste des tableaux et figures

Tableau 1 : Concentrations limites de références du baryum dans les eaux de distribution dans plusieurs pays .....	1
Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du baryum.....	3
Tableau 3 : Minerais de Baryum .....	6
Tableau 4 : Principaux producteurs de barytine et tonnes produites par an (* estimation) .	7
Tableau 5 : Teneurs en baryum (mg/L) dans les eaux souterraines en métropole. ....	11
Tableau 6 : Teneurs en baryum (mg/L) dans les eaux de surface en métropole .....	12
Tableau 7 : Concentration en baryum dans l'eau de mer.....	13
Tableau 8 : Résumé des principaux effets cliniques liés à l'exposition au baryum .....	21
Tableau 9 : Résumé des principales NOAEL et LOAEL de la littérature .....	23
Tableau 10 : Consommations d'eau du robinet pour différentes classes d'âge.....	26
Tableau 11 : Apports quotidiens de baryum par l'eau d'alimentation (en g/j) en fonction des teneurs dans l'eau .....	27
Tableau 12 : Apports alimentaires journaliers de baryum donnés par la littérature.....	27
Tableau 13 : Teneurs moyennes en baryum des aliments consommés par les français..	28
Tableau 14 : Apports alimentaires journalier de baryum chez les enfants et les adultes ..	29
Tableau 15 : VTR retenues pour la caractérisation du risque .....	31
Tableau 16 : Doses journalières tolérables (DJT) calculées .....	31
Tableau 17 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 (QD calculés à partir des VTR de l'US EPA et du RIVM). ....	35
Tableau 18 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 pour différentes consommations d'eau dont celles retenues par l'OMS (QD calculés à partir de la VTR de l'US EPA) .....	36
Tableau 19 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 pour un apport alimentaire majorant (QD calculés à partir de la VTR de l'US EPA) .....	36
Tableau 20 : Concentrations en baryum à partir de laquelle QD>1 issu de l'US EPA pour un poids corporel minimum (PC <sub>MIN</sub> ) .....	37
Tableau 21 : Récapitulatif des résultats de l'évaluation des risques.....	44

Tableau 22 : Résultats de l'enquête INCA 1999 (AFSSA/CRÉDOC/DGAL) pour les adultes .....	58
Tableau 23 : Résultats de l'enquête INCA 1999 (AFSSA/CRÉDOC/DGAL) pour les enfants .....	59
Tableau 24 : Dietary exposures of consumers to 30 elements UK Total Diet Study ( Ysart G et al., 1994).....	60
Tableau 25 : Barium contents of some common foods (Gormican, 1970).....	61
Figure 1 : Relation entre la géochimie des sols et les concentrations dans les eaux, pour le baryum (Rapport BRGM R39544) .....	9
Figure 2 : Scénarios d'exposition au baryum .....	30
Figure 3 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 1 (adulte consommateur d'eau moyen) .....	32
Figure 4 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 2 (enfant consommateur d'eau moyen) .....	33
Figure 5 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 3 (adulte fort consommateur d'eau).....	34
Figure 6 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 4 (enfant fort consommateur d'eau).....	34
Figure 7 : Schéma du protocole de gestion des dépassements.....	45

---

## Liste des sigles utilisés

---

ADN	Acide déoxyribonucléique
AFSSA	Agence Française pour la Sécurité Sanitaire des Aliments
AFNOR	Association Française de Normalisation
ATP	Adénosine TriPhosphate
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CAP	Centre antipoison
CIRC	Centre international de Recherche sur le Cancer
CSHPF	Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
DDASS	Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DGS	Direction Générale de la Santé
DJA	Dose Journalière Admissible
DJE	Dose Journalière d'Exposition
DJT	Dose Journalière Tolérable
DL50	Dose létale médiane
DME0	Dose Minimale entraînant un Effet observé
DSEO	Dose Sans Effet Observé
FI	Facteur d'Incertitude
INCA	Enquête Individuelle et Nationale sur les Consommations Alimentaires
IPCS	International Programme on Chemical Safety
ICRP	International Commission on Radiological Protection
LOAEL	Low Observed Adverse Effect Level (plus faible dose entraînant un effet toxique)
MF	Modifying Factor
MRL	Minimal Risk Level
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level (plus forte dose pour laquelle un effet toxique est observé)
NTP	National Toxicology Program
OEHHA	Office Of Environmental Health Hazard Assessment
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PC	Poids corporel
QD	Quotient de Danger
RfD	Reference Dose soit dose de référence

RIVM	Rijksinstituut voor volksgezondheid en milieu
SISE	Système d'Information en Santé-Environnement
TDI	Tolerable Daily Intake (dose journalière tolérable)
TSD	Total Diet study
UF	Uncertainty factor (facteur d'incertitude)
US EPA	Agence américaine pour la protection de l'environnement
VTR	Valeur toxicologique de référence
WHO	World Health Organisation (OMS)

## **INTRODUCTION**

Le baryum est un élément présent naturellement dans l'environnement où il se trouve sous forme complexée essentiellement à l'état solide, sous certaines formes il devient soluble. Ainsi l'eau de distribution peut parfois contenir de fortes teneurs suivant le contexte géochimique local. Les concentrations maximales autorisées du baryum dans l'eau potable sont variables d'un pays à l'autre, ainsi la France avec une limite de qualité fixée à 0,7 mg/L, alignée sur la valeur guide de l'OMS, affiche une des valeurs les plus basses comme indiqué dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Concentrations limites de références du baryum dans les eaux de distribution dans plusieurs pays**

<b>Pays</b>	<b>Référence</b>	<b>[Ba]</b>
Etats-Unis	Maximum Contaminant Level	2,0 mg/L
Canada	Concentration Maximale Autorisée	1,0 mg/L
France	Limite de Qualité	0,7 mg/L

Ces dernières années plusieurs demandes de dérogation pour l'utilisation d'une eau dépassant la valeur limite en baryum ont été transmises au Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (cf. annexe 1). Cet élément n'a pas fait l'objet dans le passé d'une recherche systématique dans les eaux de distribution. Depuis la mise en place du nouveau programme de contrôle sanitaire prévu par le code de la santé Publique au 25/12/03, des concentrations en baryum supérieures à la valeur limite ont été détectées sur de petits réseaux. Face à cette situation et devant l'absence de recommandations particulières, les DDASS ne sont pas toujours en mesure de réagir. Dans ce contexte et sous la sollicitation de la DDASS des Vosges, il est apparu intéressant de faire le point sur l'occurrence du baryum dans l'environnement, les différentes sources d'apport, les dangers associés et d'évaluer les risques liés à une consommation d'eau dont la teneur est supérieure à la valeur limite. L'objectif de ce rapport est de fournir un outil d'aide à la gestion de ce problème, notamment pour les petites collectivités. Notons que l'AFSSA, chargée par la DGS de mener des travaux d'évaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassements de limite de qualité dans les eaux de consommation, sera prochainement amenée à conduire cette démarche d'évaluation pour le baryum. Ce rapport pourra également servir de base à ce travail.

Dans un premier temps nous nous intéresserons à l'élément baryum, à sa fréquence et à son comportement dans l'environnement. Les dangers liés au baryum seront ensuite abordés avant de caractériser l'exposition des populations et les risques associés. Enfin nous proposerons des recommandations et mesures de gestion.

# 1 LE BARYUM

## 1.1 Généralités.

Le baryum est un métal alcalino-terreux (symbole Ba), identifié en 1791 dans un minéral par Thomas Charles HOPE (chimiste Ecossais 1766-1844) et isolé en 1808 de la barytine ( $BaSO_4$ ) par Sir Humphry DAVY (chimiste et physicien anglais 1778-1829).

Son nom est dérivé du grec barus ( $\beta\alpha\rho\nu\sigma$ ) signifiant lourd (le baryum est l'élément simple le plus dense ( $d=3,51$ ) de la famille des alcalino-terreux. La dénomination baryum est utilisée pour la première fois au XIXe siècle pour caractériser un minéral qui formait une gangue dans certains gisements métallifères.

Dans les régions aquifères, le baryum peut être retrouvé dans l'eau de boisson du fait de l'altération des roches sédimentaires.

### 1.1.1 Propriétés physico-chimiques.

Alcalino-terreux du groupe 2 (IIa), ses principales caractéristiques sont résumées ci-dessous :

**Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du baryum.**

Symbole :	Ba	Rayon atomique :	217 (278) pm
Numéro atomique :	56	Rayon ionique :	142 pm
Poids moléculaire :	137,34	Rayon de covalence :	198 pm
Valence :	2	Configuration :	[Xe] 6s <sup>2</sup>
Densité :	3,51 à 20°C	Etat d'oxydation :	2 (base forte)
Masse volumique :	3594 kg/m <sup>3</sup>	Electronégativité :	0,89 (Pauling)
Point de fusion :	1002 K (728,85°C)	Structure :	Cubique à corps centré
Point d'ébullition :	1910 K (1636,85 °C)	Couleur :	Blanc argenté
Isotopes :	<sup>130</sup> Ba (0,106%), <sup>132</sup> Ba (0,101%), <sup>134</sup> Ba (2,417%), <sup>135</sup> Ba (6,592%), <sup>136</sup> Ba (7,854%), <sup>137</sup> Ba (11,23%), <sup>138</sup> Ba (71,7%) stables ; <sup>133</sup> Ba, demie-vie de 10,51 ans		

C'est un métal tendre, blanc argenté lorsqu'il est pur, très malléable. Brillant lorsqu'il vient d'être coupé, il se ternit rapidement au contact de l'air puis devient brun-jaunâtre et finalement gris. Il semble qu'il se couvre d'une couche d'oxyde et de nitrure. Il possède une forte affinité pour l'eau. Il s'oxyde à l'air en formant une couche superficielle protectrice.

Le baryum métallique sous forme divisée peut s'enflammer sous l'effet d'une élévation de température et/ou au contact de l'air humide ou de tout autre gaz oxydant; il doit être conservé sous hélium ou argon sec. Il peut aussi être conservé sous pétrole.

L'eau réagit sur le baryum à température ordinaire avec dégagement d'hydrogène :



La réaction avec l'ammoniac, l'azote, l'hydrogène ou l'oxygène est très exothermique.

Le baryum peut réagir de manière explosive au contact d'un hydrocarbure halogéné tel que le monofluorotrichlorométhane, le trifluorotrichloroéthane, le tétrachlorure de carbone, le trichloréthylène et le perchloréthylène.

Il a une grande affinité pour l'azote, le soufre et le phosphore.

### **1.1.2 Composés chimiques du baryum.**

Le sulfure de baryum est phosphorescent.

Les dérivés du baryum colorent la flamme en vert.

Les principaux sels insolubles sont : le sulfate, le carbonate, les phosphates, le fluorure, les chromates, le silicate et le fluosilicate. Le carbonate est insoluble dans l'eau mais soluble dans les acides dilués. Le sulfate est insoluble dans l'eau, pratiquement insoluble dans les acides dilués.

Les sels solubles sont : le chlorure, l'oxyde, le nitrate. Le chlorure est très soluble dans l'eau, soluble dans les acides dilués. L'oxyde est soluble dans l'eau et dans les acides dilués. Le nitrate est soluble dans l'eau, insoluble dans l'alcool, soluble dans les acides (87g/L d'eau à 20°C, 347 g/L à 100°C). L'hydroxyde est partiellement soluble dans l'eau (3,89 g de Ba(OH)<sub>2</sub> dans 100 g d'eau à 20°C).

Les caractéristiques des principaux sels de baryum sont données en Annexe 2.

### **1.1.3 Méthodes analytiques.**

Il existe de nombreuses méthodes utilisées pour doser le baryum et ses composés dans l'air, les eaux, les sols et autres substrats. Il faut noter que les différentes techniques d'analyse permettent en général de mesurer la concentration totale en ions baryum sans pouvoir distinguer ses différents composés. La précision des méthodes d'analyse dépend de la technique employée et de l'échantillon analysé.

#### **1.1.3.1 Spectrométrie d'absorption atomique à 553,6 nm.**

C'est la principale méthode d'analyse du baryum et de ses composés dans l'air, l'eau, les eaux usées et dans les sols.

On distingue :

- La méthode avec flamme : utilisation d'un ensemble nébulisateur-brûleur acétylène-monoxyde de diazote – la plage de mesure est de 0,2 à 2 mg/L pour les eaux (Norme NF T 90-118).

- méthode sans flamme : utilisation d'un four graphite pyrolytique ou à balayage par l'azote ou l'argon – la plage de mesure est de 5 µg/L à 0,2 mg/L (norme NF T 90-118).

La norme NF T90-118 a été retenue comme méthode de référence pour l'analyse des eaux destinées à la consommation humaine (arrêté du 20 février 1990 – JO du 28 février 1990), avec une limite de détection de 0,02 mg/L, une précision de 15 % et une exactitude de 30 %.

Pour les mesures dans l'air, le NIOSH annonce pour cette méthode une précision de 0,025 mg/m<sup>3</sup> après filtration sur membrane d'ester de cellulose.

#### 1.1.3.2 Spéctrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique.

C'est une technique normalisée (NF FD T 90-119) destinée au dosage d'éléments minéraux à l'état de trace dans les eaux de minéralisation totale inférieure à 1 500 mg/L. Pour le baryum, la plage de mesure est de 5 à 50 µg/L.

#### 1.1.3.3 Spectrométrie à plasma couplé par induction (ICP).

On distingue deux méthodes :

- la spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES)

C'est une technique normalisée (NF EN ISO 11885) dont les limites de détection varient de 0,002 à 0,005 mg/L selon la longueur d'onde utilisée. Certains éléments (fer et vanadium) peuvent interférer avec le baryum à certaines longueurs d'onde.

C'est une méthode utilisée pour mesurer de faibles teneurs dans l'air, les eaux, le sang, les urines et les os. Une limite de détection de 4 µg/L a été calculée en 2004 par l'INERIS pour des mousses servant de capteur pour retombées atmosphériques de métaux lourds.

- la spectrométrie de masse (ICP-MS)

Cette méthode a été approuvée par le centre d'expertise en analyse environnementale du Québec qui annonce pour le baryum les limites suivantes :

Limites :	de détection	de quantification
Eaux douces	0,001 mg/L	0,003 mg/L
Eaux usées	0,0007 mg/L	0,0024 mg/L
Solides	5 mg/kg	16 mg/kg
Lixiviats	0,59 mg/L	1,95 mg/L

#### 1.1.3.4 Autres techniques.

La spectrométrie de fluorescence aux rayons X peut être utilisée pour mesurer les teneurs en baryum dans l'air (avec une limite de détection de 15 µg/m<sup>3</sup> – INCHEM 2004) ou dans les sols (Direction du laboratoire des chaussées, Québec – 1997).

L'analyse par activation neutronique permet de mesurer le baryum avec des limites de détection de 7 µg/L dans les érythrocytes et de 66 µg/L dans le plasma.

Pour les eaux et les eaux résiduaires, le dosage par chromatographie ionique du baryum dissous est normalisé (NF EN ISO 14911) pour une plage de 1 à 100 mg/L.

## **1.2 Cycle du baryum dans l'environnement.**

### **1.2.1 Etat naturel.**

Le baryum qui représente 0,05% de l'écorce terrestre (16<sup>ème</sup> élément non gazeux en ordre d'abondance) ne se trouve pas à l'état libre ( $Ba^0$ ) dans l'environnement. On ne le retrouve qu'à l'état de traces dans les roches ignées et sédimentaires, sous formes combinées.

La teneur moyenne en baryum dans les différents types de roches est de 595 ppm dans les roches ignées, 193 ppm dans les grès, 250 ppm dans les roches argileuses, 30,1 ppm dans les roches calcaires et 173 ppm dans les évaporites (After Horn & Adams, 1966).

Le baryum s'accumule dans les sédiments marins principalement sous forme de sulfate (barytine) issu de la décomposition d'Acanthaires (classe d'organismes constitués d'un squelette de sulfate de strontium où le baryum peut se substituer à hauteur de 10%).

### **1.2.2 Exploitation minière.**

Le principal minerai de baryum est la barytine (ou baryte, ou barytite) ( $BaSO_4$ ), que l'on retrouve aussi bien dans les roches sédimentaires que métamorphiques et ignées, souvent associée avec un ou plusieurs minéraux tels : la fluorine ( $CaF_2$ ), la célestite ( $SrSO_4$ ), le quartz ( $SiO_2$ ), la calcite ( $CaCO_3$ ), la dolomie ( $CaMg(CO_3)_2$ ), la pyrite ( $FeS_2$ ), la chalcopirite ( $CuFeS_2$ ), la spharélite ( $ZnS$ ) ou la galène ( $PbS$ ).

Les autres minerais de baryum sont la benstonite ( $(Ba,Sr)_6(CO_3)_{13}(Ca,Mg,Mn)_7$ ) et la sanbornite ( $BaSi_2O_5$ ). La withérite ( $BaCO_3$ ), bien que riche en oxyde de baryum ( $BaO$ ) et la norséthite  $BaMg(CO_3)_2$  ne sont pas commercialement importants.

**Tableau 3 : Minerais de Baryum**

<b>Minéraux</b>	<b>Composition</b>	<b>% de Ba</b>	<b>% de BaO</b>
Barytine	$BaSO_4$	58,8	65,7
Sanbornite	$BaSi_2O_5$	50,21	55,5
Benstonite	$(Ba,Sr)_6(CO_3)_{13}(Ca,Mg,Mn)_7$	27,79	37,98
Withérite	$BaCO_3$	69,59	77,7

En 2001, la production mondiale de barytine est estimée à 66 millions de tonnes, les principaux producteurs sont classés dans le tableau suivant (Sources : Ressources naturelles et Faune du Québec – 2005) :

**Tableau 4 : Principaux producteurs de barytine et tonnes produites par an (\* estimation)**

Rang	Pays	1997	1998	1999	2000	2001 *
1	Chine *	3 500 000	3 300 000	3 500 000	3 500 000	3 600 000
2	Inde	409 498	749 412	360 000	840 000	850 000
3	USA	692 000	476 000	434 000	392 000	400 000
4	Maroc	343 314	353 438	328 945	320 243	320 000
5	Iran	181 174	187 677	183 850	185 000 *	185 000
6	Mexique	236 606	161 555	157 953	127 420	130 000
7	Turquie	226 594	160 042	150 058	120 893	100 000
8	Allemagne	118 698	120 000 *	120 000	120 000 *	120 000
9	Bulgarie *	120 000	1 000	120 000	120 000	100 000
10	Corée du Nord	120 000	100 000	70 000	70 000	70 000

En France, la barytine provient du seul gisement de Chaillac (Indre), qui produit de 75 à 80 000 t/an.

Le baryum métallique est préparé par réduction de l'oxyde de baryum par l'aluminium, le silicium ou le ferrosilicium, à 1200°C.

### **1.2.3 Usages industriels.**

Le baryum (métal ou oxydes) ainsi que ses sels sont utilisés dans de nombreuses fabrications, notamment :

- des tubes cathodiques (piégeage des gaz),
- du papier photographique,
- du verre,
- de peintures,
- de lubrifiants résistant à haute température,
- des céramiques, émaux et porcelaines,
- en pyrotechnie,
- en teinturerie,
- dans les boues de forage, comme fluidifiant.

L'Annexe 3 fournit une liste des différents usages du baryum.

#### **1.2.4 Usages agricoles.**

Le fluorosilicate,  $BaSiF_6$ , est un pesticide. Il est employé comme insecticide et raticide. Il s'est révélé efficace dans le traitement contre les vers des vignes, le carpocapse des pommiers et le doryphore.

#### **1.2.5 Usages domestiques.**

On trouve du baryum dans les produits épilatoires, les colorants pour émaux et vernis, les peintures d'art.

#### **1.2.6 Usage médical.**

Le sulfate de baryum est utilisé comme opacifiant en radiologie.

#### **1.2.7 Rejets dans l'environnement.**

Ils sont essentiellement d'origine industrielle, les rejets résultant des activités d'extraction, de raffinage ou de transformation des minerais de baryum ou des activités manufacturières utilisant le baryum.

Dans l'atmosphère, les rejets de baryum résultent de la combustion du charbon, des produits pétroliers et des déchets.

Les dépôts sur les sols ont pour origine les activités humaines : épandage de cendres et de boues d'épurations en particulier (IPCS 1990).

Aux Etats-Unis, les rejets industriels dans l'air, les eaux et le sol ont été estimés à respectivement 900, 45 et 9 300 tonnes pour l'année 1998 (Toxic Chemical Release (TRI) database, Office of Toxic Substances, US EPA, 1998).

#### **1.2.8 Devenir dans l'environnement.**

##### **1.2.8.1 Transfert et distribution.**

###### *1.2.8.1.1 Transfert air-eau et air-sol.*

C'est principalement sous forme de sulfate et de carbonate que l'on retrouve le baryum dans l'atmosphère. Les particules en suspension peuvent s'y maintenir plusieurs jours, en fonction de leur taille. Toutefois, la majorité des particules barytées ayant une dimension supérieure à 10  $\mu m$ , elles retombent rapidement sur les sols et les eaux de surface.

###### *1.2.8.1.2 Transfert sol-eau.*

Des concentrations en baryum allant de 450 à 3000 mg/kg ont été mesurées dans les sédiments de la rivière Iowa aux Etats-Unis, laissant supposer que le baryum est éliminé de l'eau par précipitation et alluvionnement (Tsai et al., 1978).

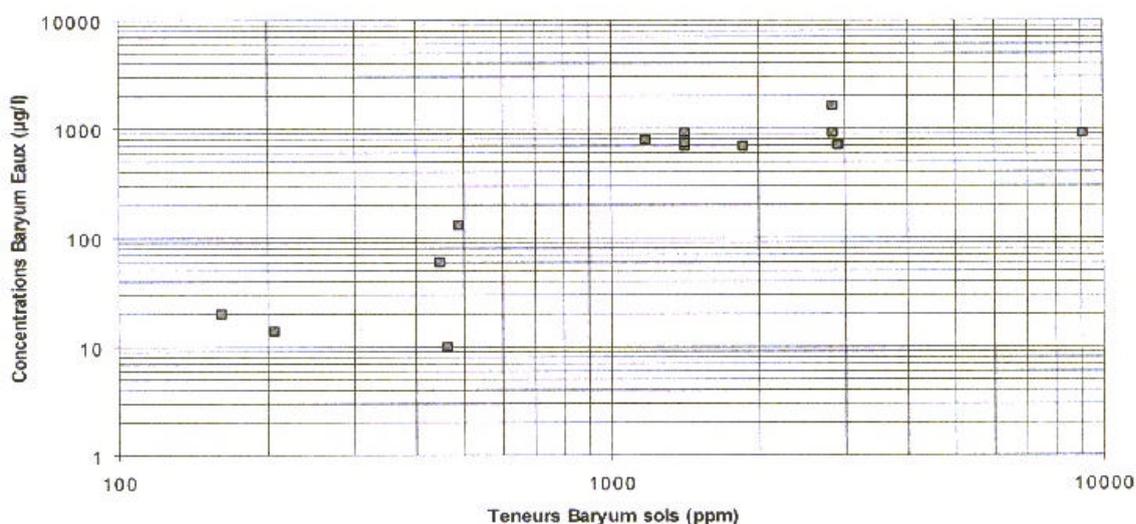
Le BRGM a réalisé plusieurs études destinées à déterminer l'origine des éléments indésirables dans les eaux souterraines.

Il apparaît ainsi que pour les aquifères superficiels, le baryum peut provenir d'échanges d'ions avec les argiles, mais que la principale source provient d'une interaction avec la barytine (sulfate de baryum).

Les concentrations en baryum étant inversement proportionnelles aux concentrations en sulfates, c'est la solubilité du sulfate de baryum (barytine) qui conditionne la concentration en baryum dans les eaux (la constante de solubilité de  $BaSO_4$  est de  $1,08 \times 10^{-10}$ ). Il est probable que les eaux peu minéralisées sont agressives vis-à-vis de la barytine présente dans les roches et les sols. Elles se chargent alors en baryum jusqu'à ce que la concentration atteigne l'équilibre de solubilité de  $BaSO_4$ , fonction de la concentration en sulfate de l'eau. On atteint ainsi des concentrations en baryum de 1 mg/L si la concentration en sulfates de l'eau est inférieure ou égale à 2 mg/L, contre 100 µg/L en baryum pour une concentration en sulfate de 20 mg/L.

Toutefois, si le BRGM a mis en évidence une relation entre la teneur en baryum dans les sols et la concentration dans les eaux, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence à partir des données du BRGM et de la base SISE-Eaux fournies par la DGS en raison du découplage des deux séries de données.

**Figure 1 : Relation entre la géochimie des sols et les concentrations dans les eaux, pour le baryum (Rapport BRGM R39544)**



#### 1.2.8.2 Transformation.

La biotransformation du baryum n'est pas documentée.

### 1.2.8.3 Bioaccumulation.

Peu de données sont disponibles concernant la bioaccumulation, mais il semble que les plantes n'accumulent qu'une faible quantité de baryum.

Le baryum est absorbé par les légumes, le raisin, les plantes fourragères, les arbres (feuilles du frêne rouge, du noyer noir, de l'hickory (caryer), pin Douglas), les noix du Brésil et les champignons (IPCS, 1990).

On estime le facteur de bioconcentration à 0,4 pour les plantes (Hope et al., 1996), 0,2 pour les insectes, et 0,02 pour les rongeurs.

Aucune étude n'a été réalisée sur l'assimilation par les plantes du baryum atmosphérique malgré la faculté de celles-ci à absorber de nombreux polluants de l'air.

Aucune donnée n'est disponible concernant les teneurs en baryum chez les animaux, mais la présence de baryum dans certains aliments et les œufs laisse penser que l'absorption animale existe.

Le corps humain contient normalement du baryum (environ 22 à 24 mg), essentiellement stocké dans les os, sans qu'il y ait accumulation avec l'âge (Kojola et al. 1978).

## **1.3 Teneurs dans l'environnement et les médias d'exposition pour l'homme.**

### **1.3.1 Teneurs dans l'air.**

Les données disponibles relatives à la teneur en baryum dans l'air sont très variables et parfois contradictoires.

Une étude indique des teneurs variant de 0,0015 à 0,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans l'air aux Etats-Unis (US EPA, 1984).

Des mesures réalisées sur 346 jours en Belgique indiquent pour 1997 une concentration moyenne de 0,020  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la station de mesure de Liège.

Les poussières contiendraient entre 20  $\mu\text{g}/\text{g}$  (poussières intérieures) et 137  $\mu\text{g}/\text{g}$  de baryum (poussières extérieures) (Creason et al., 1975).

### **1.3.2 Teneurs dans les sols.**

La concentration en baryum dans les sols varie de 100 à 3000 mg/kg, avec une moyenne de 500 mg/kg (Schroeder, 1970 ; Robinson et al., 1950 ; Brooks, 1978).

Dans son rapport R40207 de novembre 1998, le BRGM a mis à disposition des autorités sanitaires les données de l'inventaire géochimique national afin de permettre de localiser les zones à risque pour des teneurs élevées en éléments indésirables, dont le baryum.

Ce rapport indique qu'en France, les concentrations en baryum dans les sols varient de 10 à 24000 ppm, avec des valeurs qui peuvent être très variables pour une même

commune (de 89 à 21 000 ppm par exemple, pour la commune de PRANLES en Ardèche). Les mesures ont été réalisées sur les sols et les alluvions, nous ne disposons pas des teneurs en baryum permettant de déterminer les zones à risque pour les aquifères profonds. L'étude des données de l'inventaire géochimique et des cartes géologique semble indiquer, en première approche, que les teneurs en baryum dans les sols sont plus élevées dans les gneiss et dans les roches du trias à proximité de gneiss.

### 1.3.3 Teneurs dans les eaux.

#### 1.3.3.1 Eaux souterraines.

Une étude indique des concentrations en baryum variant de 0,01 mg/L (limite de quantification) à 0,20 mg/L pour les eaux souterraines en Suisse, avec une valeur médiane de 0,05 mg/L (NAQUA – 2003). On rapporte des teneurs atteignant 51 mg/L en Russie (Krejci-Graf, 1963) et 50 mg/L aux Etats-Unis (Brooks, 1960)

En France, on trouve des concentrations variant de 0,01 à 2,1 mg/L (Ministère chargé de la santé - DDASS - SISE-Eaux). Le tableau ci-dessous fournit les concentrations en baryum pour les eaux souterraines dont la teneur est supérieure à 0,5 mg/L.

**Tableau 5 : Teneurs en baryum (mg/L) dans les eaux souterraines en métropole.**

Dpt	Nom commune	Min	Max	Moy
7	PRANLES	0,81	1,10	0,94
	SAINT-VINCENT-DE-DURFORT	0,76	0,76	0,76
12	AGUESSAC	0,66	0,66	0,66
19	MAUSSAC	0,69	0,69	0,69
30	FOURQUES	1,50	1,72	1,61
41	CHAUMONT-SUR-THARONNE	0,66	0,77	0,71
	MILLANCAY	0,66	0,66	0,66
	NOUAN-LE-FUZELIER	0,60	0,60	0,60
42	SAINT ALBAN LES EAUX	1,33	1,76	1,50
45	ARDON	0,65	0,73	0,69
48	GABRIAS	0,69	1,27	0,94
	GATUZIERES	0,76	0,76	0,76
	GREZES	0,79	0,98	0,88
	LACHAMP	0,90	1,46	1,18
	MONTRODAT	1,07	1,07	1,07
	SAINT LEGER DE PEYRE	0,71	0,76	0,74
	SERVIERES	0,62	1,09	0,86
50	BREUVILLE	0,64	0,64	0,64
54	CLAYEURES	0,65	0,96	0,82
58	POUQUES LORMES	1,08	1,08	1,08
67	COSSWILLER	0,68	0,73	0,71
	MARMOUTIER	0,60	0,80	0,70
	WALDHAMBACH	0,62	0,73	0,67
70	HAUTEVELLE	0,63	0,69	0,66
80	NEUVILLE AU BOIS	0,68	0,68	0,68

Dpt	Nom commune	Min	Max	Moy
-----	-------------	-----	-----	-----

88	BRU	0,73	0,73	0,73
	CHAPELLE AUX BOIS (LA)	0,97	1,40	1,24
	FORGE (LA)	0,67	0,67	0,67
	GRUEY-LES-SURANCE	0,77	0,84	0,81
	HAYÉ (LA)	0,91	1,60	1,26
	NAYEMONT-LES-FOSSES	0,62	0,62	0,62
	SAINT-ETIENNE-LES-REMIREMONT	0,64	0,64	0,64
91	BOURAY SUR JUINE	0,60	2,10	1,45
	ITTEVILLE	0,60	1,27	0,76
02B	CALVI	1,00	1,00	1,00

La connaissance de la géologie de ces aquifères pourrait permettre de mettre en évidence une relation entre teneur en baryum dans les eaux souterraines et la nature des roches traversées.

Par ailleurs, l'extraction des données SISE-Eaux relatives aux concentrations en strontium, en fluorure et en sulfates permettrait d'établir ou confirmer le lien entre ces substances et le baryum, auquel elles sont souvent associées.

#### 1.3.3.2 Eaux de surface.

La quasi-totalité des eaux de surface contiennent du baryum, en concentration très variable selon la géologie locale et les rejets industriels.

Des teneurs variant de 7 à 15 mg/L sont mentionnées (Schroeder et al., 1972), et des concentrations moyennes de 43 à 57 mg/L pour différentes eaux de surface aux Etats-Unis (Durum, 1960 ; Kopp, 1969 ; Kopp et Kroner, 1970 ; Schroeder, 1970 ; Bradford, 1971).

En France, les données du réseau SISE-Eaux indiquent pour les eaux de surface des concentrations variant de 0,01 à 1 mg/L. Le tableau suivant fournit les teneurs en baryum dans les eaux de surface dont la teneur est supérieure à 0,5 mg/L.

**Tableau 6 : Teneurs en baryum (mg/L) dans les eaux de surface en métropole**

Dpt	Nom commune	Min	Max	Moy
4	MANOSQUE	0,92	0,92	0,92
12	CONQUES	0,64	0,64	0,64
13	AIX-EN-PROVENCE	0,73	0,73	0,73
19	SAINTE FEREOLE	0,65	0,65	0,65
48	MONTRODAT	0,60	0,75	0,70
69	RILLIEUX-LA-PAPE	0,62	0,62	0,62
71	LE CREUSOT	0,64	0,64	0,64
77	ANNET-SUR-MARNE	0,63	0,67	0,65
86	ST BENOIT	0,90	0,90	0,90
971	CAPESTERRE-BELLE-EAU	1,00	1,00	1,00
	PETIT-BOURG	1,00	1,00	1,00
	SAINT-CLAUDE	1,00	1,00	1,00
	SAINTE-ROSE	1,00	1,00	1,00

Il n'a pu être établi de relation entre teneur en baryum dans les eaux de surface et teneur en baryum dans les sols car les données de SISE-Eaux fournies par la DGS dont nous disposons pour les eaux de surface étaient trop fragmentaires, et la base extraite directement présentait de trop nombreuses valeurs aberrantes (jusqu'à 94 mg/L) pour pouvoir être exploitée.

### 1.3.3.3 Eaux de mer.

Les concentrations mesurées dans l'eau de mer sont très variables selon la localisation et la profondeur comme indiqué dans le tableau suivant :

**Tableau 7 : Concentration en baryum dans l'eau de mer**

Océan / Mer	Teneur en Ba	Source
Pacifique Nord-Est	8,5 à 32 mg/L	Wolgemuth et Brocker, 1970
Pacifique Est	5,2 à 25,2 mg/L	Bernat et al., 1972
Méditerranée	10,6 à 12,7 mg/L	
Atlantique (équatorial)	0,8 à 37 mg/L	Anderson et Hume, 1968
Atlantique Nord	0,04 à 22,8 mg/L	

### 1.3.3.4 Teneurs dans les eaux destinées à la consommation humaine.

#### 1.3.3.4.1 *Eaux de distribution.*

Aux Etats-Unis, les teneurs en baryum des eaux destinées à la consommation humaine varient de 0 à 10 mg/L (Durfor & Becker, 1964 ; Barnett et al., 1969, McCabe et al., 1970, McCabe, 1974 ; Calabrese, 1977 ; AWWA, 1985), valeur pouvant aller jusqu'à 1 g/L en présence de sels insolubles de baryum (Kojola et al., 1978).

Au Canada, les eaux peuvent contenir de 5 à 600 mg/L (Subramanian & Meranger, 1984) tandis qu'en Suède, des concentrations de 1 à 20 mg/L ont été mesurées (Reeves, 1986).

En France, la teneur en baryum dans les eaux destinées à la consommation humaine varient de 0 à 2,7 mg/L (données Ministère chargé de la santé - DDASS - SISE-Eaux ).

L'Annexe 4 donne la concentration moyenne en baryum dans les eaux distribuées dont la teneur est supérieure à 0,6 mg/L, selon le département, la commune et l'unité de distribution.

#### 1.3.3.4.2 *Eaux minérales – eaux de source.*

Les seules données disponibles sont la présence plus ou moins importante de baryum dans les eaux de source, sans que les concentrations soient fournies :

Eaux très riches en baryum : Saint-Alban

Eaux assez riches en baryum : Puy-Saint-Georges, Badoit, Chambon, Arvie, Parot, Le Boulou

#### **1.3.4 Teneurs dans les aliments.**

Le baryum est présent en forte proportion dans la noix du Brésil (*Bertholletia excelsa*) (1,5 à 3 g/kg – Robinson et al., 1950 ; Smith, 1971), mais on le trouve également dans le blé (dans la tige et les feuilles plutôt que dans les épis – Robinson et al., 1950), les tomates et le soja.

La teneur dans les aliments varie de moins de 0,2 mg/kg dans les viandes à 27 mg/kg dans le thé à infuser (Gormican, 1970).

Les feuilles de tabac contiennent de 24 à 170 mg/kg (Voss & Nicol, 1960), mais la majorité du baryum se retrouve dans les cendres. Il n'existe aucune donnée sur la présence de baryum dans la fumée de tabac.

## **2 CARACTERISATION DES DANGERS**

### **2.1 Toxicocinétique du baryum**

#### **2.1.1 Incorporation et absorption**

L'absorption du baryum dans l'organisme peut se faire :

- par voie pulmonaire,
- par voie gastro-intestinale.

Aucune donnée relative à l'absorption par voie cutanée n'existe.

##### **2.1.1.1 Voie pulmonaire**

Il n'existe pas de preuve directe de l'absorption par cette voie chez l'homme. Seule une étude de Zschiesche et al (1992) sur des travailleurs exposés au baryum a montré un accroissement des teneurs en baryum des urines de ces travailleurs sans que l'on sache si le baryum était absorbé par l'appareil respiratoire ou par la voie gastro-intestinale (ingestion du baryum par le mucus bronchique).

Dans de nombreuses études animales, l'absorption par voie pulmonaire a pu être démontrée aussi bien pour les composés insolubles que solubles du baryum.

##### **2.1.1.2 Voie gastro-intestinale**

L'absorption du baryum par cette voie a été clairement démontrée pour l'homme comme pour les animaux suite à l'ingestion d'eau ou d'aliments présentant des teneurs élevées en baryum.

Cependant, le degré d'absorption dans l'organisme du baryum dépend de plusieurs paramètres tels que l'âge (les rats jeunes, en période d'ossification, absorbent davantage de baryum que les plus âgés), du contenu du tube digestif (plus d'absorption chez des rats à jeun) ou du régime alimentaire.

#### **2.1.2 Distribution dans l'organisme**

Une fois absorbé, le baryum est rapidement distribué par le sang dans l'organisme. Puis il se fixe en très grande majorité dans les os et dans les dents (95%). Il se retrouve peu dans le sang ou dans les tissus mous.

#### **2.1.3 Métabolisme**

Le baryum n'est pas métabolisé dans le corps mais il peut être transporté ou incorporé métaboliquement dans certains tissus (surtout les os) (ATSDR 1992).

Ces mécanismes d'incorporation ne sont pas bien connus mais semblent être similaires à ceux du calcium (WHO, US EPA 1990). De plus, par échange ionique, le baryum est susceptible de prendre la place du calcium déjà présent dans les os.

#### **2.1.4 Excrétion**

L'excrétion du baryum se fait essentiellement par voie fécale et dans une moindre mesure par voie urinaire.

### **2.2 Mode d'action – Toxicité générale**

D'une manière générale, il a été constaté que le baryum entrait plus facilement dans les cellules que les autres ions plus petits et plus chargés.

#### **2.2.1 Effets membranaires**

Le baryum stimule l'ATPase membranaire (Na-K dépendante). Il se comporte comme un bloqueur sélectif de la perméabilité potassique passive transmembranaire.

Il entraîne :

- une dépolarisation des membranes cellulaires,
- une diminution de la perméabilité des ions  $K^+$ ,
- une inhibition de la pompe à calcium.

#### **2.2.2 Effets cellulaires généraux**

Sa toxicité pourrait être liée à son aptitude à dissocier les combinaisons sulfatées protoplasmiques au niveau des muscles lisses et du tissu nerveux.

#### **2.2.3 Effets sur les muscles**

Le chlorure de baryum provoque une contraction durable avec mouvements fibrillaires des muscles striés et lisses. Les contractions induites par les ions baryum sont principalement dues au relargage du calcium et en partie à une stimulation directe des éléments contractiles.

L'exploration électrophysiologique ne montre aucune anomalie de conduction des fibres nerveuses. Il n'y a pas non plus de modifications histologiques des cellules musculaires.

#### **2.2.4 Effets cardiaques**

Au niveau cardiaque, on observe un ralentissement et une augmentation de l'amplitude des contractions et des fibrillations à forte dose. Le baryum augmente l'excitabilité et la conductibilité cardiaque. Il provoque également une forte vasoconstriction artérielle par stimulation directe du muscle artériel.

### **2.2.5 Effets sur l'estomac**

Les ions  $Ba^{2+}$  stimulent la sécrétion acide de l'estomac par diminution de la différence de potentiel et diminution de l'entrée intracellulaire des ions chlorures.

### **2.2.6 Effets sur la sécrétion biliaire**

Le baryum stimule la fonction biliaire.

### **2.2.7 Effets sur les métabolismes**

Les sels de baryum stimulent :

- la sécrétion de calcitonine, hormone hypocalcémiant,
- la sécrétion d'insuline en l'absence d'hyperglycémie par cation sur le pancréas.

Ces effets métaboliques sont, pour la plupart, provoqués par action directe du  $Ba^{2+}$  simulant celle du  $Ca^{2+}$ .

## **2.3 Toxicologie par voie orale**

La majorité des études qui évaluent les effets sur la santé de l'exposition au baryum le sont pour la voie orale qui est la voie d'exposition majoritaire.

### **2.3.1 Effets sur les animaux de laboratoire**

#### **2.3.1.1 Exposition aiguë**

De nombreuses études ont été menées sur des rats de laboratoire pour déterminer les  $DL_{50}$ . Celles-ci varient dans un intervalle compris entre 118 et 800 mg/kg poids corporel.

Outre la mort, une exposition aiguë au baryum peut engendrer les effets suivants :

- effets gastro-intestinaux : inflammation des intestins (Borzelleca et al 1988),
- effets hépatiques : foie sombre (Borzelleca et al 1988),
- effets rénaux : augmentation de la masse des reins (Borzelleca et al 1988).

#### **2.3.1.2 Exposition sub-chronique**

Plusieurs études (NTP 1994, Tardiff et al. 1980) menées sur des rats exposés à différentes doses d'exposition au baryum dans l'eau de boisson sur des périodes de 13 semaines ont montré quelques effets pour des doses élevées tels que la diminution de la consommation d'eau et/ou du poids corporel.

#### **2.3.1.3 Exposition chronique**

##### ***2.3.1.3.1 Effets systémiques***

Une étude réalisée par Perry et al. 1983, 1985, 1989 a pu montrer, pour des rats exposés à différentes concentrations de baryum dans l'eau pendant des durées allant jusqu'à 16 mois, que la pression artérielle avait augmenté de manière significative. Les rats les plus

exposés pendant 16 mois présentait même une diminution des contractions, de l'excitabilité électrique du cœur et une réduction des teneurs en ATP et phosphocréatine du myocarde.

Une autre étude menée par Kopp et al. en 1985 aboutit aux mêmes conclusions.

Une étude de même nature réalisée par Schroeder et Mitchener (1975) a montré que les rats exposés au baryum présentaient des taux de cholestérol (pour les femelles) et des glycémies (pour les mâles) plus élevés.

#### 2.3.1.3.2 Effets cancérigènes

Plusieurs études ont été réalisées par le NTP en 1994, Charles River, Mac Cauley et al., Perry et al afin de déterminer si le baryum dans l'eau de boisson était cancérigène.

Les examens histologiques effectués lors de l'autopsie des rats décédés n'ont révélé aucun effet du baryum sur l'incidence des tumeurs.

#### 2.3.1.3.3 Effets mutagènes

Aucune étude *in vivo* n'a été réalisée pour déterminer l'effet mutagène du baryum.

Des études *in vitro* ont en revanche été menées :

- le chlorure de baryum et le nitrate de baryum ne provoquent pas de mutations de gènes sur des bactéries telles que *Salmonella typhimurium*, *Bacillus subtilis* ou *Escherichia coli*,
- l'induction d'erreurs de transcription de l'ADN viral par le chlorure de baryum s'est révélée négative,
- le chlorure de baryum est mutagène pour les cellules de lymphome de souris en culture mais il ne provoque pas d'aberrations chromosomiques sur des cultures de cellules ovariennes de hamster.

#### 2.3.1.3.4 Effets reprotoxiques

Une étude réalisée par Tarasko et al. (1977) pour des rates exposées à du carbonate de baryum a montré une diminution de la durée du cycle menstruel et une altération de la proportion entre follicules ovariens matures et morts. Cependant, le manque d'informations générales sur cette étude (sur les méthodes expérimentales, les méthodes statistiques utilisées, la présence de témoins ou non) rend cette étude peu fiable.

Une étude (Dietz et al. 1992) sur des rats mâles et femelles d'abord exposés au chlorure de baryum puis mis ensemble pour qu'ils se reproduisent n'a montré aucun effet toxique du baryum pour la reproduction.

## **2.3.2 Effets sur la santé humaine**

### **2.3.2.1 Exposition aiguë**

Les cas d'exposition aiguë au baryum recensés chez l'homme relèvent d'une ingestion accidentelle ou intentionnelle.

Ainsi, 6 décès ont pu être constatés après ingestion de sels de baryum :

- 2 étaient dus à un arrêt cardiaque,
- 1 était dû à une hémorragie gastro-intestinale sévère,
- les 3 autres causes n'ont pu être déterminées.

Les principaux effets qui ont pu être observés sont les suivants :

- détresse respiratoire nécessitant une ventilation artificielle,
- hypertension et anomalies du rythme cardiaque,
- problèmes gastro-intestinaux : diarrhées, vomissements, douleurs gastriques,
- faiblesses musculaires et paralysies,
- problèmes rénaux : sang dans les urines, insuffisance rénale.

D'autres effets tels que la dégénérescence du foie et de la rate ont pu être observés après l'autopsie d'une femme décédée de l'ingestion de sels de baryum.

### **2.3.2.2 Exposition chronique**

Quelques études cliniques et épidémiologiques ont été réalisées afin de déterminer les effets sur la santé humaine de l'exposition chronique au baryum.

#### *2.3.2.2.1 Etude clinique Wones et al 1990*

11 hommes volontaires en bonne santé ont ingéré 1,5 litres d'eau par jour contenant différentes concentrations en chlorure de baryum. L'étude a duré 10 semaines :

- les 2 premières correspondaient à une période témoin (pas d'ingestion),
- les 4 semaines suivantes, ils ont ingéré l'équivalent de 0,11 mg/kg.j de baryum,
- les 4 dernières semaines, ils ont ingéré l'équivalent de 0,21 mg/kg.j de baryum.

Les résultats de l'étude sont les suivants :

- absence d'effet sur la pression artérielle,
- aucune modification des tests sanguins (cholestérol, triglycérides...),
- aucune modification du rythme cardiaque.

#### *2.3.2.2.2 Etudes épidémiologiques*

Plusieurs études épidémio-écologiques ont révélé des associations entre la teneur en baryum dans l'eau potable et la mortalité attribuable aux maladies cardiovasculaires. Par exemple, à partir d'une analyse des taux de mortalité en fonction des variations de la concentration de nombreux éléments traces dans l'eau potable, Schroeder et Kramer et Elwood et al. ont signalé une corrélation statistiquement significative entre la

concentration en baryum dans l'eau potable et la mortalité due à l'ensemble des maladies cardio-vasculaires. Par ailleurs, Brenniman et al. ont signalé des taux de mortalité statistiquement plus élevés pour les maladies cardio-vasculaires et cardiopathies entre 1971 et 1975 pour des communautés de l'Illinois (USA) consommant une eau potable à forte teneur en baryum (entre 2 et 10 mg/L) comparativement à d'autres communautés consommant une eau beaucoup moins chargée en baryum (0,2 mg/L).

Suite à cette étude épidémiologique, Brenniman et Lévy (1984) ont conduit une étude de la prévalence des maladies cardio-vasculaires dans deux communautés spécifiques de l'Illinois. 1175 adultes de West Dundee où la teneur en baryum dans l'eau est de 7 mg/L et 1203 adultes de McHenry où la teneur en baryum est de 0,1 mg/L ont fait l'objet d'enquêtes et de tests pour détecter les maladies cardio-vasculaires. Il n'y avait pas de différences statistiquement significatives entre les 2 populations en ce qui concerne l'hypertension et les cardiopathies.

#### *2.3.2.2.3 Exposition chronique et effets cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques ou sur le développement*

Aucune étude humaine n'a été réalisée pour connaître les effets cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques du baryum.

Une étude a été menée concernant les effets sur le développement d'une exposition au baryum par Morton et al. en 1976. Cette étude a pu montrer une corrélation significative négative entre concentration en baryum dans l'eau et taux de malformations congénitales du système nerveux central.

## **2.4 Toxicologie par voie respiratoire**

L'étude de l'exposition au baryum par inhalation se limite à des études sur des populations professionnelles.

### **2.4.1 Exposition aiguë**

Les intoxications par voie pulmonaire sont très rares. Un cas mortel très ancien est cité avec de l'oxyde de baryum.

Un cas d'intoxication aiguë par inhalation a été décrit. Il s'agit d'un individu de 22 ans qui a reçu sur le visage de la poudre de carbonate de baryum et qui l'a inhalée sans l'avaler.

Cet individu présentait les symptômes suivants :

- crampes abdominales,
- nausées et vomissements,
- hyper-salivation,
- démarche ébrieuse.

## 2.4.2 Exposition chronique

Parmi les populations professionnelles de mineurs exposées aux composés insolubles de baryum par inhalation, de nombreux cas de barytose ont été décrits. Il s'agit d'une pneumocose de type non colléagineuse avec une absence de fibrose et de destruction de l'alvéole pulmonaire. Cliniquement, on n'observe aucun symptôme respiratoire car la fonction pulmonaire n'est pas modifiée. Seule une radiographie montre la présence de micro-nodules sur l'ensemble des poumons. Quand l'exposition cesse, ces images de nodules disparaissent.

L'exposition aux composés solubles du baryum est peu renseignée. Cependant, il semble que les effets toxiques de cette exposition soient très proches de ceux d'une ingestion de composés du baryum.

## 2.5 Résumé des effets cliniques

Le tableau suivant résume les principaux effets cliniques recensés liés à une exposition au baryum.

**Tableau 8 : Résumé des principaux effets cliniques liés à l'exposition au baryum**

Type d'effet	Type d'exposition	Description des effets
Cardiovasculaire	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ralentissement avec bradycardie, arythmie</li><li>- Hypertension</li><li>- Vasoconstriction coronarienne</li><li>- Arrêt cardiaque</li></ul>
	Chronique	Tachycardie, arythmie, extrasystoles persistantes
Respiratoires	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"><li>- Contraction de la musculature (douleurs thoraciques)</li><li>- Arrêt respiratoire</li></ul>
	Chronique	Barytose
Neurologiques	Aiguë	Troubles neuromusculaires, tremblements
	Chronique	-
Musculaires	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"><li>- Contractures musculaires</li><li>- Sensation de faiblesse</li><li>- Paralysies flasques de certains muscles</li></ul>
	Chronique	Asthénie
Gastro-intestinaux	Aiguë	<ul style="list-style-type: none"><li>- Brûlures bucco-oesogastriques,</li><li>- Hypersialorrhée</li><li>- Gastro-entérique hémorragiques</li></ul>

Type d'effet	Type d'exposition	Description des effets
	Chronique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anorexie</li> <li>- Nausées, dyspepsie</li> <li>- Sécheresse des muqueuses bucco-pharyngées</li> <li>- Hémorragies gastro-intestinales</li> </ul>

## **2.6 Relation dose/réponse – Valeurs Toxicologiques de Référence**

La relation dose/réponse pour une substance est caractérisée par la valeur toxicologique de référence (VTR). Chaque VTR est exprimée pour une voie d'exposition et pour une durée d'exposition fixées. Elles sont généralement déterminées par des instances internationales ou nationales.

Il existe deux types de VTR :

- les VTR correspondant à des effets déterministes ou à seuil,
- les VTR correspondant à des effets stochastiques ou sans seuil.

### **2.6.1 Démarche générale de détermination des VTR**

#### 2.6.1.1 Effets stochastiques

Ce type d'effets concerne principalement les effets cancérigènes et mutagènes.

La démarche se divise en 4 étapes :

- la détermination (en général par expérimentation animale) d'une distribution de probabilité de réponses à différentes doses élevées pour que les effets soient observables,
- la détermination des niveaux d'exposition pour l'homme en appliquant des facteurs d'incertitude,
- la modélisation des données expérimentales,
- l'extrapolation des hautes doses aux basses doses.

L'effet cancérigène du baryum n'a pas été démontré. Il a été en effet classé D par l'US EPA (substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme par voie orale). La littérature ne recense donc aucune VTR caractérisant le pouvoir cancérigène du baryum.

### 2.6.1.2 Effets déterministes

Les études effectuées sur la toxicité du baryum ont mis en évidence l'existence d'effets déterministes d'où la nécessité de déterminer une VTR à seuil. Au delà du seuil, la gravité des effets croît avec la dose administrée.

La détermination d'une VTR à seuil se déroule en deux étapes :

- détermination de l'effet critique : des études toxicologiques menées sur l'homme ou des animaux permettent de mettre en évidence une Dose Minimale entraînant un Effet observé (DMEO) ou une Dose Sans Effet Observé (DSEO),
- application de facteurs d'incertitudes, de sécurité ou de protection (FI) traduisant la prise en compte de variabilités intra ou inter espèces,
- la VTR résulte du calcul suivant : 
$$VTR = \frac{DSEO \text{ ou } DMEO}{\sum FI}$$

### 2.6.2 Recensement des effets critiques

De nombreuses études ont permis la détermination de DSEO ou NOAEL (No Observed Adverse Effects Level) et de DMEO ou LOAEL (Low Observed Adverse Effects Level) pour la voie orale.

Elles s'expriment en quantité de baryum par kg de poids corporel et par jour. Le tableau suivant les recense :

**Tableau 9 : Résumé des principales NOAEL et LOAEL de la littérature**

Forme Voie	Type d'étude	Effets critiques	NOAEL ou LOAEL mg Ba/kg pc/j	Référence de l'étude
BaCl <sub>2</sub>	Etude sub-chronique sur des rats	Augmentation de la pression systolique	NOAEL = 0,51 LOAEL = 5,1	Perry et al. 1983
Ba(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Etude chronique sur des rats	-	NOAEL = 0,7	Schroeder et Mitchener 1975a
BaCl <sub>2</sub>	Etude chronique sur des rats	Augmentation du poids des reins	NOAEL = 45 LOAEL = 75	NTP 1994
BaCl <sub>2</sub>	Etude sub-chronique sur 11 hommes	-	NOAEL = 0,21	Wones et al. 1990
BaCl <sub>2</sub>	Etude épidémiologique dans l'Illinois	-	NOAEL = 0,21	Brenniman et al. 1984

### 2.6.3 Détermination des VTR

A partir des études et des doses critiques relevées dans la littérature un certain nombre d'organismes proposent de déterminer une valeur toxicologique de référence par ingestion du baryum.

Ces VTR s'expriment sous forme :

- de « reference dose » RfD pour l'US EPA,
- de « minimal risk level » MRL pour l'ATSDR,

- de « tolerable daily intake » TDI pour l'OMS, le RIVM ou Health Canada.

En ce qui concerne le baryum, l'US EPA, le RIVM, l'ATSDR et l'OMS ont des approches différentes pour la définition d'une valeur toxicologique de référence.

#### 2.6.3.1 Approche de l'US EPA

Les études de référence pour l'US EPA pour la détermination d'une VTR sont :

- l'étude épidémiologique Brenniman et al. 1984,
- l'étude clinique Wones et al. 1990.

Ces 2 études proposent une NOAEL de 0,21 mg Ba/kg/j.

L'US EPA propose d'appliquer à cette valeur un facteur d'incertitude de 3 pour prendre en compte les différences entre adultes et enfants.

La valeur toxicologique de référence retenue est donc :

$$\text{RfD} = 0,07 \text{ mg Ba/kg}_{\text{pc}}/\text{j}$$

#### 2.6.3.2 Approche du RIVM

Le RIVM a utilisé les mêmes études de référence que l'US EPA.

En revanche, le facteur d'incertitude choisi vaut 10 pour la variabilité intra-espèces.

Il en résulte une VTR qui vaut :

$$\text{TDI} = 0,02 \text{ mg Ba/kg}_{\text{pc}}/\text{j}$$

#### 2.6.3.3 Approche de l'OMS

L'OMS a déterminé une valeur guide de concentration en baryum dans l'eau à partir de l'étude épidémiologique de Brenniman et al.

La concentration en baryum correspondante à la NOAEL est de 7,1 mg/L. En appliquant un facteur d'incertitude de 10 pour la prise en compte de la variabilité intra-espèces, la valeur de référence obtenue est de 0,7 mg/L.

Cependant, l'OMS évoque également la détermination d'une VTR à partir des résultats de l'étude de Perry et al. (1983) faite sur des rats et qui aboutit à une NOAEL de 0,51 mg/kg/j.

Les facteurs d'incertitudes appliqués sont :

- 10 pour la variabilité intra-espèces,
- 1 pour la variabilité inter-espèces car l'étude épidémiologique Brenniman et al. montre que les hommes sont beaucoup moins sensibles que les rats au baryum.

La VTR vaut donc :

$$\text{TDI} = 0,05 \text{ mgBa/kg}_{\text{pc}}/\text{j}.$$

La valeur guide de référence dans l'eau calculée à partir de cette TDI (avec une fraction de la dose en baryum apporté par l'eau de boisson de 20 %) donne 0,3 mg/L.

Actuellement, la valeur retenue par l'OMS est 0,7 mg/L.

#### 2.6.3.4 Approche de l'ATSDR

L'ATSDR estime qu'il n'est pas possible de calculer une valeur toxicologique de référence (MRL par voie orale) à partir des NOAEL déterminés par les études Brenniman et al. et Wones et al. car la valeur obtenue aurait été beaucoup plus petite que la dose journalière estimée de baryum apporté par l'ensemble des sources d'exposition (air, eau, aliments).

### **3 EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES**

#### **3.1 Evaluation de l'exposition des populations**

##### **3.1.1 Apport par l'eau**

L'eau du réseau public de distribution peut être ingérée sous différentes formes :

- eau froide (pour la boisson),
- eau chauffée pour la préparation du café, du thé...
- eau incorporée aux aliments lors de la préparation et de la cuisson des aliments.

Les données de consommation issues de l'enquête INCA 1999 (enquête individuelle et nationale sur les consommations alimentaires) constituent la seule source d'information d'ampleur nationale sur la consommation d'eau du robinet pour la boisson. Elle a été réalisée auprès de 3003 sujets représentatifs de la population française. Ces données distinguent la consommation d'eau « non chauffée » et la consommation d'eau « totale » excluant l'eau incorporée aux aliments. Cette dernière peut représenter 170 à 280 mL par jour (Meyer et al., 1999).

Sont retenues les données pour les seuls consommateurs d'eau du robinet (96,3 % des consommateurs adultes et 84,2 % des consommateurs enfants). Par ailleurs afin de prendre en compte l'eau incorporée dans les aliments, ces consommations sont augmentées de 0,17 L pour les enfants et 0,28 L pour les adultes, respectivement, les valeurs basse et haute de la fourchette énoncée plus haut. Ainsi sont retenues pour l'évaluation de l'exposition les consommations figurant dans le Tableau 10.

**Tableau 10 : Consommations d'eau du robinet pour différentes classes d'âge**

Population	Consommation (L/j)	
	Moyenne	95 <sup>ème</sup> perc.
Adultes (> 15 ans)	0,82	1,65
Enfants de 3 à 14 ans	0,45	0,93

Ces valeurs sont des valeurs moyennes, elles ne reflètent pas les disparités régionales qui ont été soulevées par l'enquête INCA. L'AFSSA, dans le cadre de sa démarche d'évaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassement des limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, a retenu les données de consommation d'eau de référence de l'OMS. Ces valeurs de 0,75 L/j pour les nourrissons, 1 L/j pour les enfants et 2 L/j pour les adultes sont très majorantes et pourront être utilisées pour une analyse de sensibilité.

Nous avons donc choisi de retenir les données de consommation issues de l'enquête INCA. Il est possible ainsi de déterminer les apports en baryum par l'eau pour différentes concentrations dans l'eau (cf. Tableau 11). Nous avons retenu un intervalle allant de 0 à 2 mg/L qui est la valeur maximale rencontrée dans une eau de distribution depuis 2000 (base SISE-eaux).

**Tableau 11 : Apports quotidiens de baryum par l'eau d'alimentation (en g/j) en fonction des teneurs dans l'eau**

Teneur en baryum dans l'eau (mg/L)	Apports de baryum en g/j			
	consommations adultes		consommations enfants	
	moyenne	95 <sup>ème</sup> perc.	moyenne	95 <sup>ème</sup> perc.
0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	0,4	0,8	0,2	0,5
1	0,8	1,7	0,4	0,9
1,5	1,2	2,5	0,7	1,4
2	1,6	3,3	0,9	1,9

### 3.1.2 Autres sources d'apports

#### 3.1.2.1 Apport par l'alimentation

Nous avons relevé des données dans la littérature (voir Tableau 12). Ces données font référence à des études anciennes et représentatives des populations anglo-saxonnes (US et UK), elles présentent des valeurs allant de 0,30 à 1,77 mg de baryum apporté quotidiennement par l'alimentation.

**Tableau 12 : Apports alimentaires journaliers de baryum donnés par la littérature**

Apports (mg/j)	population	Lieu	Source
0,30 à 1,70	2 hôpitaux, 300 écoles, individus	USA	Underwood, 1977
< 0,30 (été) < 0,59 (hiver)	Hôpitaux (adultes)	USA	Gormican, 1970
0,65 à 1,77	5 adultes	USA	Tipton et al., 1966-69
0,60	n.d.	UK	Hamilton et Minski, 1972
0,90	n.d.	UK	ICRP, 1959
1,24	n.d.	UK	Schroeder et al., 1972
0,67	n.d.	UK	ICRP

n.d. non documenté

Nous avons souhaité calculer des valeurs plus représentatives de la population française, pour cela nous disposons des données relatives aux concentrations en baryum dans les aliments ainsi que des données sur les habitudes alimentaires des français (enquête INCA 1999).

Les teneurs en baryum dans les aliments sont issues de deux études. La première, de type TDS (Total Diet Studies), recense des données issues de campagnes de prélèvements d'échantillons des denrées les plus consommées au Royaume-Uni réalisées par Ysart en 1999 (cf. Annexe 1). La deuxième est du type régime dupliqué et s'intéresse aux éléments inorganiques, dont le baryum, présents dans les repas servis à l'hôpital. Elle a été réalisée aux Etats-Unis par Gormican en 1970 (cf. Annexe 1). Ces deux études se complètent, grâce à elles nous avons pu identifier les concentrations en baryum dans la plupart des aliments consommés par les Français. Lorsque deux valeurs étaient disponibles nous avons retenu la plus pénalisante (concentration en baryum la plus élevée). Pour certains plats ou aliments (spécifiques de la consommation des français) la concentration en baryum n'était établie dans aucune étude. Dans ce cas nous avons émis des hypothèses sur la composition en différents éléments pour lesquels la teneur était connue. Les teneurs retenues et les hypothèses faites figurent dans le Tableau 13.

**Tableau 13 : Teneurs moyennes en baryum des aliments consommés par les français**

Type d'aliments	mg Ba /kg	Source	Hypothèses
Pain biscottes	1	Ysart, 1999	
Pâtes	1,1	Gormican, 1970	
Riz et semoule	0,4	Gormican, 1970	
Viennoiseries	0,75	Gormican, 1970	composition (70% farine, 20% sucre, 10% œufs)
Biscuits	0,75	Gormican, 1970	composition (70% farine, 20% sucre, 10% œufs)
Pâtisseries	0,75	Gormican, 1970	composition (70% farine, 20% sucre, 10% œufs)
Lait	0,1	Gormican, 1970	
Ultra frais laitier	0,31	Ysart, 1999	
Fromages	1,3	Gormican, 1970	moyenne
Oeufs et dérivés	0,76	Gormican, 1970	
Beurre	0,31	Ysart, 1999	Idem ultra frais laitier
Viandes	0,27	Ysart, 1999	
Volailles et gibiers	0,2	Gormican, 1970 et Ysart, 1999	
Charcuterie	0,2	Gormican, 1970	
Poissons	0,2	Gormican, 1970	
Légumes (hors pommes de terre)	0,38	Ysart, 1999	
Pommes de terre et dérivés	0,2	Gormican, 1970	
Légumes secs	0,5	Ysart, 1999	
Fruits	0,35	Ysart, 1999	
Sucres et dérivés	0,84	Ysart, 1999	
Jus de fruits et sodas	0,1	Gormican, 1970	moyenne
Boissons alcoolisées	nc	nd	
Café	0,08	Gormican, 1970	
Thé et boissons chaudes	0,04	Gormican, 1970	
Pizzas, quiches et tartes salées	0,46	Gormican, 1970	composition (40% farine, 30% viande, 30% légumes)
Sandwiches	0,54	Gormican, 1970	composition (80% pain, 10% légumes, 10% viande)
Soupes	0,8	Gormican, 1970	assimilées aux légumes

Type d'aliments	mg Ba /kg	Source	Hypothèses
Plats composés	0,3	Gormican, 1970	composition (50% viande, 50% légumes)
Entremets	0,1	Gormican, 1970	glaces et sorbets
Compotes et fruits cuits	0,25	Ysart, 1999	moyennes

Nous avons corrélé ces teneurs en baryum aux consommations des français recensées dans l'enquête INCA afin de calculer les apports de baryum par l'alimentation. Cette enquête fait la distinction entre les adultes et les enfants et donne les consommations pour différentes classes d'âge (cf. Annexe 2). Les résultats des apports journaliers calculés en baryum par l'alimentation apparaissent dans le tableau suivant :

**Tableau 14 : Apports alimentaires journalier de baryum chez les enfants et les adultes**

Enfants					
Classe d'âge	3-5 ans	6-8 ans	9-11 ans	12-14 ans	Moyenne
Apports (g/j)	0,50	0,57	0,57	0,60	0,56
Adultes					
Classe d'âge	15-24 ans	25-44 ans	45-64 ans	65 ans et plus	Moyenne
Apports (g/j)	0,54	0,62	0,70	0,71	0,64

Les apports calculés ici recourent les données trouvées dans la littérature (cf. Tableau 12). Nous conserverons ces valeurs pour la suite du calcul car elles sont plus représentatives de la population française.

Nous remarquons que les apports quotidiens de baryum par l'alimentation chez les enfants, malgré une plus faible consommation d'aliments, sont en moyenne très proches des apports chez les adultes. Ceci s'explique par le fait que les teneurs en baryum sont relativement élevées dans les produits laitiers qui sont consommés en plus grande proportion par les enfants.

### 3.1.2.2 Apport par l'air (baryum adsorbé sur les poussières)

Cette voie d'exposition est prise en compte dans le cadre de l'exposition professionnelle. Concernant la population générale, les teneurs en baryum dans l'air sont mal documentées, il est donc difficile d'estimer l'apport par cette voie. Une des plus récentes études américaines mentionnent des concentrations en baryum dans l'air ambiant allant de 0,0015 à 0,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (US EPA, 1984). Ces valeurs sont très faibles et un calcul rapide permet de vérifier que les apports par inhalation d'air sont très minoritaires comparés aux apports par l'eau et alimentation. Ainsi un adulte respirant 20 L d'air par min (ICRP, 1994), avec une concentration en baryum dans l'air de 0,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , inhale moins de 0,03 mg de baryum par jour. Faisant l'hypothèse que tout le baryum inhalé est absorbé, cela représenterait seulement 4 % des apports en baryum par l'alimentation. Nous ne prendrons donc pas en compte cette voie pour le calcul de l'exposition.

### 3.1.3 Scénarios d'exposition

A partir de ces données de consommation d'eau et d'aliments obtenues pour les différentes classes d'âge nous avons établi 4 profils de consommateurs, soit une combinaison de ces 4 paramètres : enfants, adultes, consommateur d'eau moyen ou fort consommateurs (95<sup>ème</sup> percentile). Concernant l'apport alimentaire nous avons conservé la valeur moyenne des apports pour les 4 classes d'âge des enfants de 3 à 14 ans et des adultes (> 15 ans). Ces 4 scénarios sont illustrés à la Figure 2.

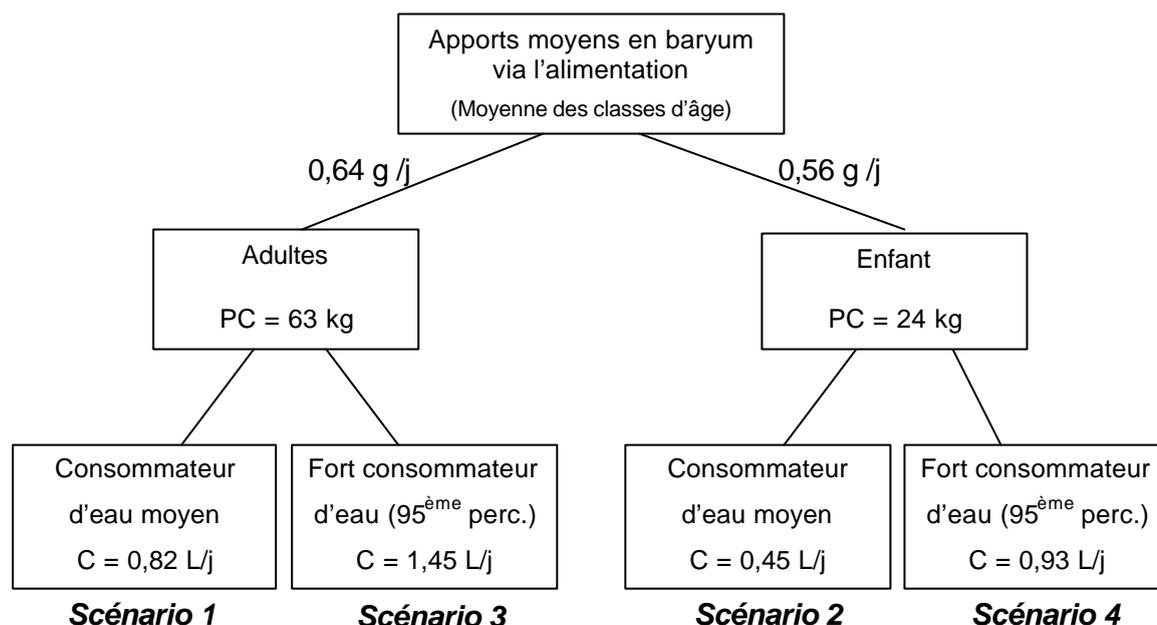


Figure 2 : Scénarios d'exposition au baryum

Les poids corporels sont issus de la base CIBLEX. Pour les enfants, nous avons retenu la moyenne des poids des enfants appartenant à la tranche d'âge comprise entre 2 et 16 ans, soit 24 kg. Pour les adultes (> 17 ans) nous avons retenu la moyenne des deux sexes soit 63 kg.

### 3.2 Caractérisation du risque

Au regard des niveaux d'exposition par voie orale (eau et aliments) auxquels des populations sont susceptibles d'être exposées, nous ne nous intéresserons qu'aux risques liés à une exposition chronique au baryum. En effet, les effets sanitaires aigus liés à une exposition au baryum correspondent à des niveaux d'ingestion de quelques dizaines ou centaines de grammes de baryum.

### 3.2.1 Méthodologie

#### 3.2.1.1 Choix des VTR

La caractérisation des dangers nous a permis de dégager 3 VTR. La valeur guide de l'OMS n'étant pas en accord avec la VTR de l'OMS ; cette dernière n'a pas été retenue pour l'analyse. Le calcul de risque sera basé sur celle de l'US EPA et celle du RIVM comme indiqué dans le Tableau 15.

**Tableau 15 : VTR retenues pour la caractérisation du risque**

Organisme	VTR (mgBa/kg <sub>pc</sub> /j)	Dernière mise à jour
US EPA	0,07	1998
RIVM	0,02	2000

Ces 2 VTR ont été dérivées de la même étude mais n'appliquent pas les mêmes facteurs de sécurité. En première approche nous conserverons les deux et comparerons les résultats du calcul du risque obtenu pour ces deux valeurs.

#### 3.2.1.2 Représentation graphique

Les différents scénarios d'exposition au baryum présentés au paragraphe 3.3.1 sont représentés graphiquement. La dose journalière d'exposition (DJE) correspondant aux apports quotidiens de baryum pour un individu (en g/j) est représentée en ordonnée. Elle est ici fonction de la teneur en baryum dans l'eau de distribution, ces teneurs allant de 0 à 2 mg/L. Cette exposition chronique est considérée comme invariable dans le temps et peut être ainsi directement comparée aux doses journalières tolérables (DJT). Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer de facteur correctif de durée d'exposition. Par ailleurs, ces VTR représentent une dose d'exposition et non pas une dose absorbée par l'organisme, nous n'appliquons donc pas de facteur d'assimilation aux apports calculés. Ces doses sont exprimées ici en mg/j et correspondent aux VTR rapportées au poids corporel moyen (PC<sub>MOY</sub>). Ainsi nous obtenons 4 DJT à partir des VTR de l'US EPA et du RIVM rapportée chacune aux poids définis pour les enfants et pour les adultes, comme indiqué dans le Tableau 16.

**Tableau 16 : Doses journalières tolérables (DJT) calculées**

Poids corporels (PC) en kg	DJT (US EPA) en g/j	DJT (RIVM) en g/j
24 (enfants)	1,68	0,48
63 (adultes)	4,41	1,26

Ces graphiques donnent une bonne représentation du quotient de danger (QD) :

$$QD = \frac{DJE}{DJT}$$

Le risque devient inacceptable lorsque le QD est supérieur à 1. Graphiquement, tant que la courbe d'exposition est au-dessous de la droite représentative de la DJT, le risque est acceptable ( $QD < 1$ ). Ainsi il est aisé de définir les concentrations en baryum pour lesquelles ce dernier devient inacceptable (à l'intersection des 2 courbes).

### 3.2.2 Scénarios « Consommateurs d'eau moyen »

Le scénario n°1 (représenté à la Figure 3) reflète la situation pour un adulte répondant aux critères suivants :

- $PC_{MOY} = 63$  kg
- $C = 0,82$  L/j (moyenne)

Apport quotidien (mg/j)

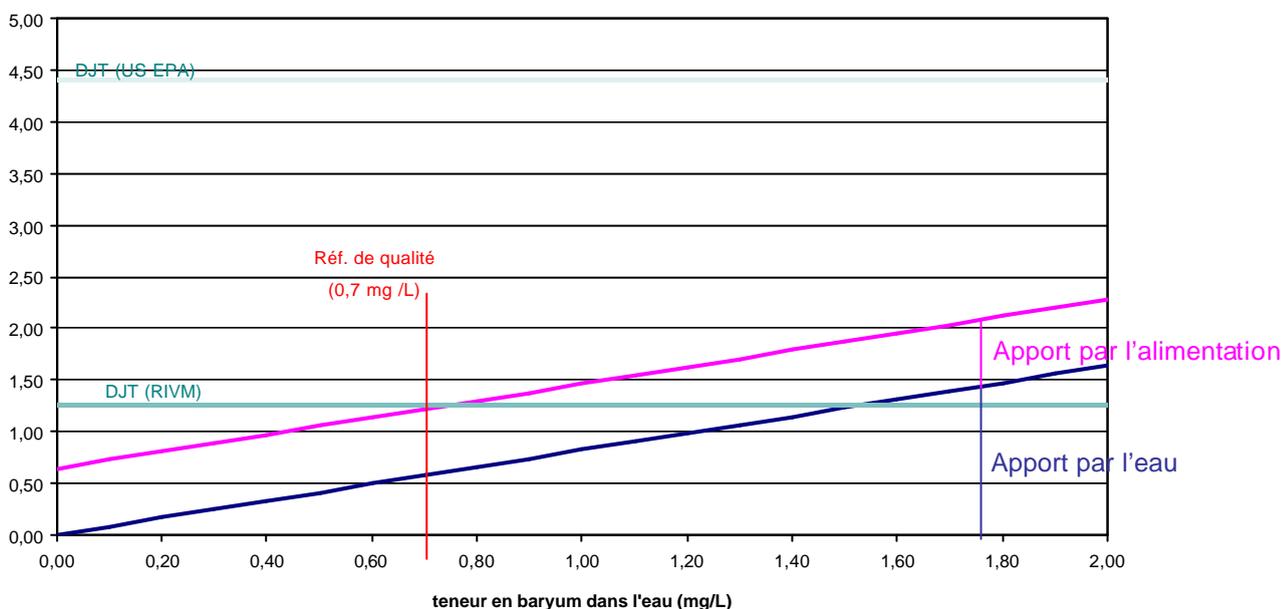
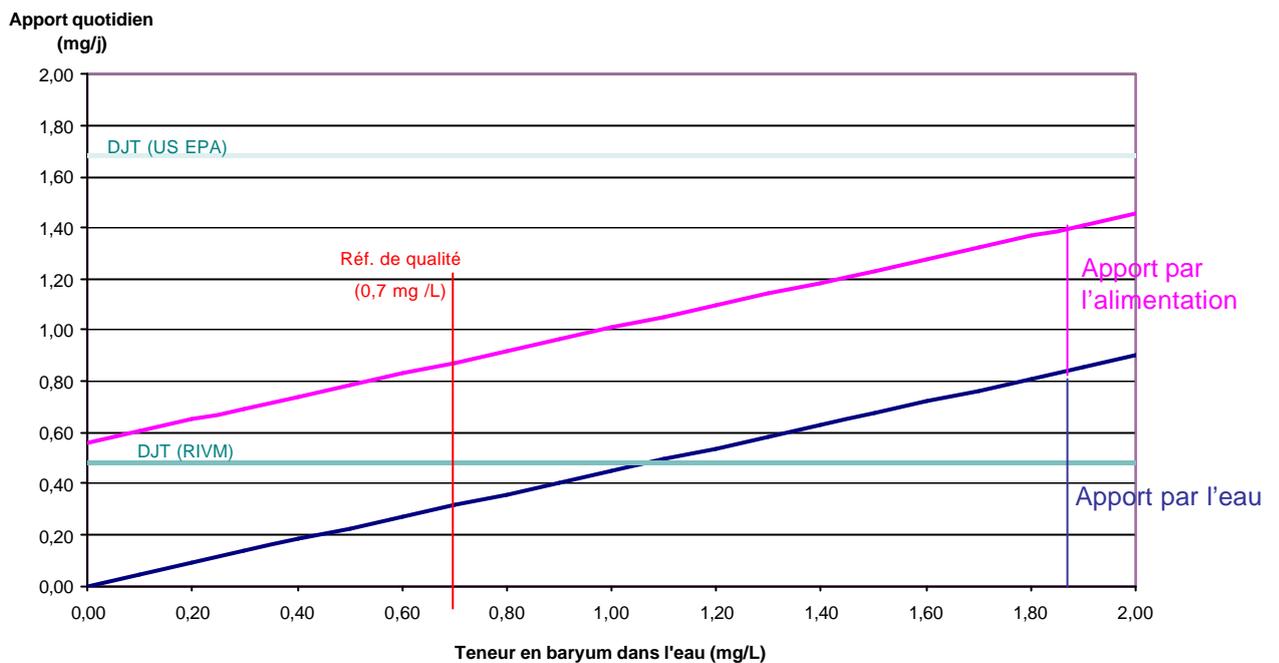


Figure 3 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 1 (adulte consommateur d'eau moyen)

Le scénario n°2 (représenté à la Figure 4) reflète la situation pour un enfant répondant aux critères suivants :

- $PC_{MOY} = 24$  kg
- $C = 0,45$  L/j (moyenne)



**Figure 4 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 2 (enfant consommateur d'eau moyen)**

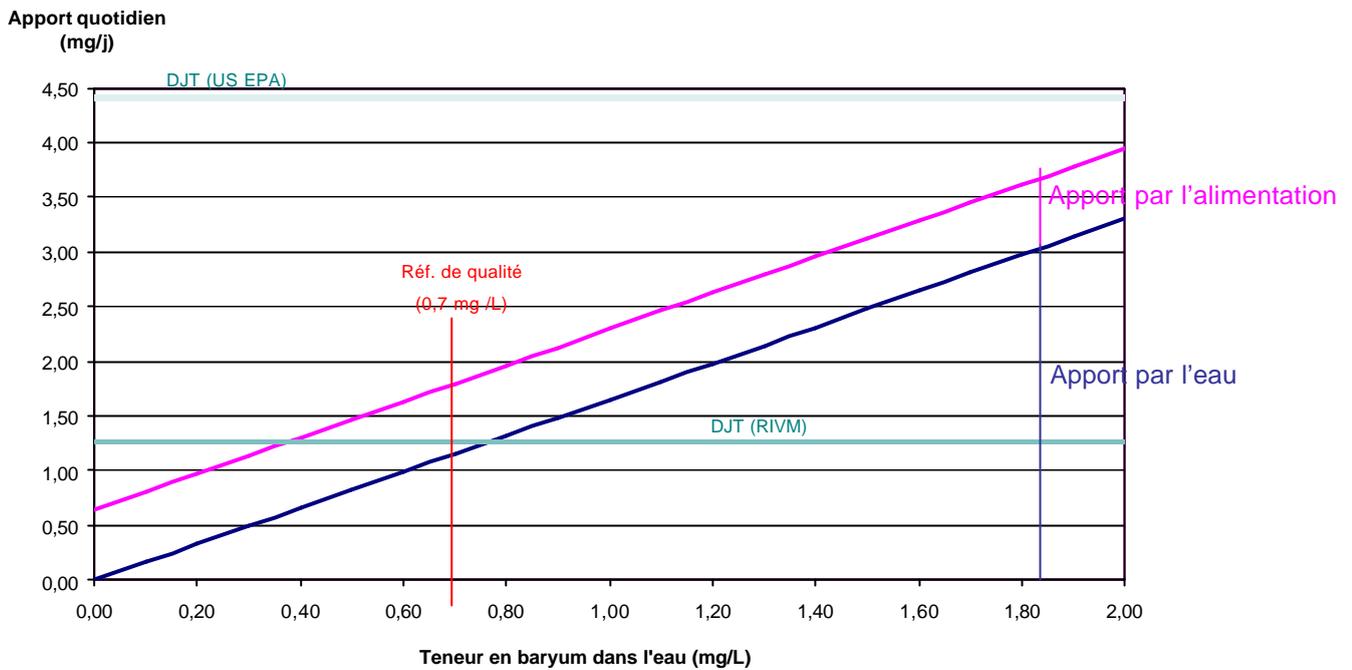
Dans le scénario adulte nous remarquons que la DJT du RIVM est atteinte pour une teneur en baryum dans les eaux de 0,75 mg/L, proche de la référence de qualité. Par ailleurs, dans le scénario n°2 (enfants), la DJT du RIVM est déjà atteinte si on prend en compte les seuls apports alimentaires. Ainsi, quelle que soit la teneur en baryum dans l'eau d'alimentation le quotient de danger est supérieur à 1. Si nous appliquons le même raisonnement à la valeur de l'EPA, le quotient de danger reste inférieur à 1 quelle que soit la teneur en baryum comprise entre 0 et 2 mg/L dans les deux scénarios.

Ces scénarios sont représentatifs d'une situation moyenne, nous nous sommes intéressés à des scénarios mettant en cause des populations plus sensibles à savoir des individus gros consommateurs d'eau. Ils sont schématisés de la même manière ci-après.

### **3.2.3 Scénarios « Fort consommateurs d'eau »**

Le scénario n°3 (représenté à la Figure 5) reflète la situation pour un adulte répondant aux critères suivants :

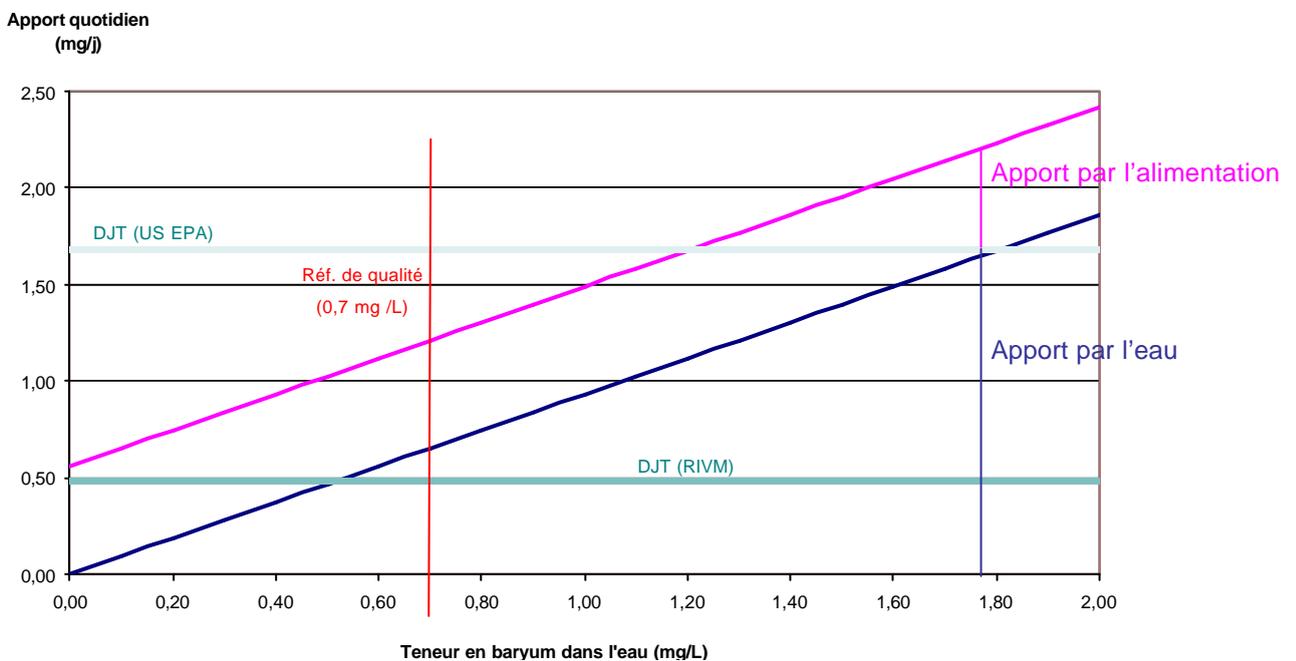
- $PC_{MOY} = 63 \text{ kg}$
- $C = 1,45 \text{ L/j}$  (95<sup>ème</sup> percentile)



**Figure 5 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 3 (adulte fort consommateur d'eau)**

Le scénario n°4 (représenté à la Figure 6) reflète la situation pour un enfant répondant aux critères suivants :

- $PC_{MOY} = 24 \text{ kg}$
- $C = 0,93 \text{ L/j}$  (95<sup>ème</sup> percentile)



**Figure 6 : Apports en baryum via l'eau et les aliments pour une concentration croissante en baryum dans l'eau de boisson - scénario 4 (enfant fort consommateur d'eau)**

Dans ces scénarios maximalistes, la DJT du RIVM dans le scénario enfant est largement atteinte par les seuls apports alimentaires, quant au scénario adulte, elle est atteinte pour

de très faibles teneurs en baryum dans l'eau, inférieures à la référence de qualité, soit 0,42 mg/L. Lorsqu'on s'intéresse à la DJT de l'EPA, dans le scénario n°4, le QD devient supérieur à 1 pour une teneur en baryum de 1,1 mg/L. De même, dans le scénario n°2, ce quotient de danger est atteint pour la concentration en baryum de 2,3 mg/L.

### 3.2.4 Bilan des différents scénarios

Le tableau suivant indique les concentrations en baryum à partir desquelles le quotient de danger devient supérieur à 1 selon les différents scénarios.

**Tableau 17 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 (QD calculés à partir des VTR de l'US EPA et du RIVM).**

	Population	[Ba] critique mg/L
VTR (RIVM)	adultes	$0,42 < [Ba] < 0,75$
	enfants	$\forall [Ba]$
VTR (US EPA)	adulte	$2,6 < [Ba] < 4,6$
	enfant	$1,1 < [Ba] < 2,3$

Le choix de la VTR pour le calcul de risque influence fortement les résultats. Ces différences seront commentées lors de l'analyse des incertitudes sur les VTR.

Le calcul réalisé à partir de la VTR de l'US EPA montre que le risque pour les enfants devient inacceptable pour des teneurs rencontrées dans l'eau distribuée. Nous n'avons pas inclus dans notre analyse un scénario pour les nourrissons car nous n'avons pas de données concernant leurs apports alimentaires. Cependant le calcul peut se faire, considérant un nourrisson de 5 kg ingérant 0,75 L d'eau de distribution par jour sans autre apport alimentaire de baryum. La concentration critique de baryum associée à la VTR de l'US EPA est de 0,47 mg/L (0,13 mg/L associée à celle du RIVM). Ainsi nous constatons que ces valeurs sont très basses, les nourrissons constitueraient une population particulièrement fragile.

### 3.2.5 Analyse de sensibilité

Nous avons testé 4 scénarios. Nous nous interrogeons ici sur la variabilité du quotient de danger en fonction d'autres hypothèses. Nous testerons en particulier des valeurs maximalistes pour les consommations en eau (celles préconisées par l'OMS), pour les apports alimentaires et pour le poids corporel. Compte tenu des résultats précédents, pour cette analyse il n'apparaît pas utile de faire les calculs pour la VTR du RIVM. Le QD étant supérieur à 1 quel que soit le scénario (pour  $[Ba] > 0,75$  mg/L), nous ne mettrons rien de plus en évidence. L'analyse qui suit reprend uniquement la VTR de l'EPA.

### 3.2.5.1 Apports par l'eau

Nous avons souhaité tester les valeurs de consommation d'eau de l'OMS citées au paragraphe 3.1.1, soit 1 L/j pour les enfants et 2 L/j pour les adultes. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 18.

**Tableau 18 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 pour différentes consommations d'eau dont celles retenues par l'OMS (QD calculés à partir de la VTR de l'US EPA)**

	Population	[Ba] critique (mg/L)
Scénarios initiaux	adulte	2,6 < [Ba] < 4,6
	enfant	1,1 < [Ba] < 2,3
Consommations OMS	adulte	1,9 < [Ba] < 4,6
	enfant	1 < [Ba] < 2,3

Nos valeurs de forte consommation d'eau étant proches de celle préconisées par l'OMS, les concentrations critiques en baryum varient peu. Cependant nous constatons que pour le scénario «adulte», la teneur critique de baryum dans l'eau devient inférieure à la valeur maximum observée de 2 mg/L.

### 3.2.5.2 Apports alimentaires

Les données de la littérature concernant les apports de baryum par l'alimentation indiquent des valeurs allant jusqu'à 1,77 mg/j, de la même manière il est intéressant de mesurer l'influence de ce paramètre.

**Tableau 19 : Concentrations en baryum à partir desquelles QD>1 pour un apport alimentaire majorant (QD calculés à partir de la VTR de l'US EPA)**

	Population	[Ba] critique (mg/L)
Apports moyens	adulte	2,6 < [Ba] < 4,6
	enfant	1,1 < [Ba] < 2,3
Apports majorants	adulte	1,8 < [Ba] < 3,2
	enfant	∇ [Ba]

Nous constatons ici que ce paramètre a également une forte influence sur le résultat. Ainsi pour les enfants le quotient de danger devient supérieur à 1 quelle que soit la teneur en baryum dans l'eau. Les apports alimentaires seuls deviennent critiques.

### 3.2.5.3 Poids corporel

Les poids corporels retenus dans nos scénarios sont des poids moyens, nous avons souhaité recalculer ces valeurs avec les poids corporels les plus faibles rencontrés pour les enfants et les adultes soit respectivement 12 et 42 kg (source : base CIBLEX).

**Tableau 20 : Concentrations en baryum à partir de laquelle QD>1 issu de l'US EPA pour un poids corporel minimum (PC<sub>MIN</sub>)**

	<b>Population</b>	<b>[Ba] critique (mg/L)</b>
PC <sub>MOY</sub>	adulte	2,6 < [Ba] < 4,6
	enfant	1,1 < [Ba] < 2,3
PC <sub>MIN</sub>	adulte	1,6 < [Ba] < 2,8
	enfant	0,3 < [Ba] < 0,6

Ce paramètre fait également fortement varier les concentrations critiques en baryum dans l'eau. Pour les adultes, les valeurs calculées sont proches des valeurs rencontrées dans les eaux, pour les enfants ces valeurs deviennent inférieures à la référence de qualité (0,7 mg/L).

## 3.3 Analyse des incertitudes

### 3.3.1 Incertitudes sur la détermination des valeurs toxicologiques de référence

#### 3.3.1.1 Les études ayant permis la détermination des VTR

La caractérisation des risques montrent que l'apport en baryum par l'alimentation est un facteur déterminant et qu'il peut suffire à engendrer un risque important (QD > 1) pour des populations telles que les enfants. Il est nécessaire de s'intéresser à la prise en compte de ce facteur dans les études ayant permis la détermination des VTR.

Les deux VTR proposées par le RIVM et l'US EPA ont été déterminées à partir des 2 mêmes études : Wones et al. et Brenniman.

Dans l'étude clinique Wones et al., aucun régime alimentaire spécifique n'a été apporté aux 11 volontaires de l'étude. Celle-ci précise qu'un régime hospitalier apporte quotidiennement 0,75 mg/j de baryum (valeurs proches de celles déterminées dans la partie concernant l'exposition) et qui est la moyenne des apports aux Etats-Unis.

Dans l'étude épidémiologique de Brenniman et al. sur les communautés de l'Illinois aucune information n'est précisée sur les teneurs en baryum des aliments consommés par les populations concernées par l'étude. A priori, ces teneurs ne doivent pas être sensiblement différentes des moyennes américaines.

Finalement, la détermination des VTR repose sur une exposition liée à l'eau. Il persiste une incertitude sur le calcul du risque lié à l'alimentation (différence de degré d'absorption entre l'eau et les aliments).

Par ailleurs, ces 2 études aboutissent à une NOAEL de 0,21 mg/kg/j or aucune autre étude humaine ne vient ni confirmer cette valeur ni proposer une valeur de LOAEL. Il est donc difficile de savoir si la valeur de NOAEL utilisée est proche ou éloignée du seuil « réel » à partir duquel les effets néfastes apparaissent.

#### 3.3.1.2 Approche de l'US EPA

Les résultats de la caractérisation des risques montrent que pour le scénario le plus défavorable (enfant fort consommateur d'eau), le quotient de danger est supérieur à 1 pour des teneurs en baryum dans l'eau supérieures à 1,1 mg/L.

L'US EPA a choisi d'appliquer un facteur d'incertitude 3 au NOAEL pour déterminer sa VTR (prise en compte des différences adulte/enfant). La confiance qu'elle accorde à sa valeur est moyenne.

#### 3.3.1.3 Approche du RIVM

Les quotients de danger calculés à partir de la VTR du RIVM montrent que :

- pour les adultes, le QD est supérieur à 1 pour des valeurs plus basses que la référence de qualité de 0,7 mg/L,
- pour les enfants, le seul apport alimentaire engendre un QD supérieur à 1.

Le facteur d'incertitude appliqué par le RIVM est de 10. Il semble que cette valeur apparaît comme protectrice et engendre des situations inacceptables peu réalistes.

#### 3.3.1.4 Approche de l'ATSDR

L'ATSDR a choisi de ne pas déterminer une VTR à partir des études choisies par les deux organismes précédents car :

- l'étude épidémiologique n'a pas permis de caractériser des doses associées à l'apparition d'effets sanitaires,
- l'étude Wones et al. présentait un nombre trop faible de sujets (11).

D'autre part, déterminer une VTR à partir des études animales de Perry et al (qui ont montré l'apparition d'effets cardiovasculaires avec un LOAEL de 5,1 mg/kg/j) aurait conduit selon ATSDR à une valeur :

- 1,5 à 4 fois plus petite que l'apport journalier quotidien pour une exposition par voie orale de durée intermédiaire,
- 19 à 50 fois plus petite que l'apport journalier quotidien pour une exposition chronique par voie orale.

### **3.3.2 Incertitudes sur les scénarios d'expositions**

#### **3.3.2.1 Apports de baryum par l'alimentation**

Les teneurs en baryum dans les différents plats et aliments ne sont pas systématiquement connues. Ainsi nous avons dû faire des hypothèses sur la composition de certains plats recensés dans l'enquête INCA afin d'extrapoler les teneurs en baryum des aliments examinés dans les études américaines et britanniques. Ces hypothèses sont très approximatives, elles permettent de dégager un ordre de grandeur des apports en baryum par l'alimentation des français sans tenir compte des variabilités individuelles. Par ailleurs, nous avons fait l'hypothèse que les teneurs en baryum dans les aliments ne varient pas d'un lieu à l'autre ni dans le temps.

#### **3.3.2.2 Teneurs en baryum dans les eaux**

Les analyses de concentration en baryum dans les eaux d'alimentation sont peu fréquentes. La prescription réglementaire est de 1 prélèvement tous les 2 ans à 1 tous les 5 ans pour des petites collectivités. Ainsi il est difficile de connaître le comportement du baryum dans la nappe au cours du temps. Des phénomènes de relargages instantanés ou de fluctuations saisonnières ne peuvent être exclus.

## **3.4 Discussion – Commentaires**

### **3.4.1 Comparaison à une autre évaluation des risques sanitaires**

Suite à des cas de dépassements des teneurs réglementaires en baryum dans l'eau d'adduction, plusieurs DDASS ont demandé des avis auprès d'organismes tels que le CSHPF ou l'AFSSA.

La DDASS de l'Essonne a sollicité la CIRE Ile de France et le Centre Anti-Poison (CAP) de Paris pour qu'ils réalisent une évaluation des effets sanitaires et des risques pour la santé liés à la distribution d'une eau (commune de Lardy) dont la teneur en baryum dépassait régulièrement la valeur réglementaire de 0,7 mg/L.

Les concentrations dans l'eau distribuée sont comprises entre 0 et 1,1 mg/L.

Les caractéristiques de cette étude sont les suivantes :

- le scénario étudié est celui d'un homme de 70 kg consommant 2L d'eau par jour et dont l'apport de baryum par l'eau se fait à hauteur de 20%,
- deux calculs ont été menés avec des valeurs toxicologiques différentes :
  - o la VTR de l'US EPA: 0,07 mg/kg/j,
  - o une VTR de 0,15 mg/kg/j calculée à partir d'une étude sur des rats menée par McCauley et coll. (NOAEL de 15 mg/kg/j et facteur d'incertitude de 100).

La conclusion de cette étude est la suivante : « il apparaît que les données toxicologiques disponibles permettraient de fixer la valeur limite pour la concentration du baryum dans l'eau destinée à la consommation humaine entre 0,5 et 1,05 mg/L selon les données de base et la méthode utilisées ».

Nous pouvons constater que les résultats de l'évaluation du CAP tout comme ceux de notre évaluation varient beaucoup en fonction des données toxicologiques qui sont utilisées.

#### **3.4.2 Commentaires sur les valeurs toxicologiques de référence**

L'analyse des incertitudes quant à la détermination des valeurs toxicologiques de référence a montré un certain manque de consensus entre les différents organismes experts.

Il semble donc nécessaire que les connaissances sur la toxicologie du baryum soient approfondies notamment dans la détermination des seuils dits critiques comme les NOAEL et surtout les LOAEL.

#### **3.4.3 Amélioration de la connaissance sur les apports alimentaires**

Au regard de l'importance qu'a l'exposition au baryum des populations via la voie alimentaire dans notre évaluation des risques, une caractérisation plus détaillée de ces apports est nécessaire pour affiner les résultats de l'évaluation.

## **4 RECOMMANDATIONS – GESTION DU RISQUE**

Dans cette partie nous nous intéressons aux mesures envisageables pour prévenir les risques liés à des teneurs élevées en baryum dans l'eau de distribution, l'ingestion d'eau de boisson étant la principale voie d'exposition au baryum à côté des aliments. Le baryum étant présent naturellement dans les ressources en eau et peu lié aux activités anthropiques exercées sur le bassin versant, il s'agit de mesures visant essentiellement à réduire l'exposition des populations assorties d'une surveillance de la ressource. Les effets sanitaires étant peu spécifiques il n'existe pas de préconisations ou de traitements médicaux relatifs à une ingestion de baryum chronique trop importante.

### **4.1 Mesures de prévention**

La présence de baryum à des teneurs élevées dans les eaux souterraines est identifiée localement. A ce jour l'analyse de ce paramètre n'est pas faite systématiquement, le décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 fixe la fréquence des analyses en fonction de la taille de la population desservie. A titre d'exemple, de 50 à 499 habitants, une analyse tous les 2 ans est prescrite et de 500 à 1999 habitants, une tous les ans. Les données dont nous disposons ne nous permettent pas d'affirmer que les teneurs en baryum sont peu fluctuantes. En l'absence de certitudes nous recommandons une augmentation de la fréquence des analyses dans les régions sensibles afin de connaître l'exposition réelle des populations au cours du temps.

La présence de baryum dans les eaux souterraines étant liée au fond géochimique, les variations de concentration ne sont pas instantanées. Ainsi la fréquence des analyses doit être ajustée selon la variation du niveau de la nappe (haut ou bas) afin de mettre en évidence d'éventuelles fluctuations liées aux sécheresses ou pluviométries importantes. Cette recommandation s'accompagne d'une vigilance particulière à avoir vis-à-vis de la technique de mesure employée.

### **4.2 Mesures visant à réduire l'exposition**

#### **4.2.1 Elimination du baryum**

Suite à la demande du Syndicat des Eaux et de l'Assainissement du Bas-Rhin, en 1997, des essais d'élimination du baryum (menés par IRH Environnement) ont été réalisés sur les eaux du puits de Moulin-Champagne présentant des teneurs allant de 500 µg/L à 750 µg/L. L'objectif était de ramener ces concentrations à un niveau proche de la valeur guide, qui était à l'époque de ces travaux de 100 µg/L (fixée aujourd'hui à 700 µg/L). Ainsi ces

essais donnent des pistes de réflexion quant à la mise en œuvre de certains traitements et de leur efficacité.

Le baryum ( $Ba^{2+}$ ) a les mêmes propriétés physico-chimiques que  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $Sr^{2+}$ . En tenant compte de ces similitudes, les procédés de traitement suivant ont été envisagés :

- Précipitation du baryum sous forme de carbonate et d'hydroxydes puis séparation par décantation et/ou filtration.
- Fixation du baryum selon des techniques d'adsorption sur supports minéraux (Neutralite ou Akdolit) ou sur charbons actifs, ou par des techniques d'échanges d'ions (résines).

Les différents procédés de traitements examinés et leurs performances sont décrits ci-après.

#### 4.2.1.1 Procédés d'adsorption

##### 4.2.1.1.1 *Adsorption sur charbon actif*

Les données de la bibliographie indiquent que le traitement du baryum par du charbon actif est inefficace (< 10 % de rendement).

##### 4.2.1.1.2 *Résines échangeuses d'ions*

Les résultats de la bibliographie indiquent que ce type de procédé permet d'éliminer le baryum avec des rendements supérieurs à 95 % ainsi que de s'affranchir de la production de boues. Cependant les inconvénients suivants sont soulevés :

- Malgré une fixation sélective par rapport au  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ , ce traitement entraîne une déminéralisation soit un abaissement du TH et une augmentation de l'agressivité. Il faut envisager un traitement supplémentaire de reminéralisation et de mise à l'équilibre.
- Un agrément par le ministère de la santé est nécessaire pour l'utilisation de ces résines.
- Se pose ensuite le problème du traitement des eaux à forte teneur en baryum issues de la régénération des résines, le rejet à la station d'épuration entraînerait une contamination des boues.

##### 4.2.1.1.3 *Autres procédés : filtres Neutralit ou Akdolit*

Ces filtres agissent sur le baryum selon le principe de l'échange d'ions. Il est donc à prévoir une saturation progressive des sites actifs avec la nécessité de cycle de lavage. Par ailleurs ces matériaux (essentiellement composés de  $CaCO_3$  et  $MgO$ ) utilisés pour la reminéralisation sont consommés par la réaction avec le  $CO_2$  libre de l'eau, il faudra donc envisager leur remplacement.

La faisabilité technico-économique de la mise en œuvre de tels traitements dépend des facteurs suivants :

- le temps de contact nécessaire
- la capacité de fixation (attention au relargage de baryum)
- l'incidence sur la neutralisation de l'eau

Les essais sur Neutralit montrent que pour une utilisation avec un temps de séjour de 40 min (soit le double de celui utilisé pour une simple reminéralisation), ce traitement permet d'atteindre la valeur de 350 µg/L, la teneur initiale étant de 550 µg/L. D'autres essais sont nécessaires pour évaluer le fonctionnement du filtre sur la durée (durée de cycle, efficacité de la régénération, durée de vie).

Les essais ont montré que même avec de fortes charges et un temps de séjour très court, l'élimination du baryum sur l'Alkdolit est quasi-totale. Cependant ces essais ont été réalisés sur une courte durée et donc ne garantissent l'efficacité d'un tel matériau au cours d'un cycle de longue durée et après lavage et remise en service. Un prélèvement ponctuel tendrait à montrer une saturation rapide du matériau (lavages fréquents, régénération du lit filtrant).

#### 4.2.1.2 Précipitation du baryum

##### 4.2.1.2.1 *Traitements physico-chimique classiques*

Ce traitement consiste à précipiter le baryum sous une forme insoluble (barytine ou witherite) à l'aide des réactifs suivants :  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Des essais réalisés au laboratoire avec du  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et  $\text{NaOH}$  ont montré l'inefficacité de ces réactifs, aucune précipitation n'a été observée.

##### 4.2.1.2.2 *Traitement au sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ , gypse) à pH 11*

Ce traitement est basé sur des constatations effectuées sur les eaux de forage de l'Illinois où la teneur en baryum augmente dès que les teneurs en sulfate s'abaissent (< 50 mg/L). Des essais au laboratoire ont montré des rendements d'élimination supérieurs à 95 % mais les inconvénients suivants sont soulevés :

- Ce traitement provoque un abaissement du TH impliquant la nécessité d'un traitement supplémentaire de reminéralisation et de mise à l'équilibre.
- L'eau restituée est impropre à la consommation à cause de son pH trop élevé (pH = 11). Un traitement supplémentaire est nécessaire pour rétablir un pH inférieur à 9.
- Les boues fines produites sont difficiles à séparer.

##### 4.2.1.2.3 *Traitement à la chaux (floculation par l'alginate)*

A pH 10-11, le baryum précipite sous forme de  $BaCO_3$ , si on augmente le pH il se forme de l'hydroxyde de baryum ( $Ba(OH)_2$ ) qui est plus soluble, ainsi il peut y avoir une redissolution du baryum. Des essais réalisés au stade pilote ont montré l'efficacité de ce traitement permettant d'atteindre une teneur résiduelle en baryum de 100 µg/L. Ce procédé présente notamment l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et d'être bien maîtrisé de par son utilisation courante en traitement de l'eau. Il est de plus modulable en fonction des débits traités.

En contrepartie les boues produites devront être éliminées. Par ailleurs, les essais montrent que l'eau traitée après décantation possède une turbidité résiduelle, un étage de filtration de finition doit être envisagé. Ce procédé, comme les autres, n'affranchit pas de la mise en oeuvre d'une étape de neutralisation et remise à l'équilibre finale.

#### **4.2.2 Mélange avec une ressource à faible teneur**

En cas d'eaux fortement chargées en baryum, il peut être envisagé le mélange avec une ressource à faible teneur afin d'abaisser la concentration.

#### **4.2.3 Abandon de la ressource**

Dans le cas où aucune des solutions présentées ici n'est techniquement réalisable, l'abandon de la ressource doit être envisagé.

### **4.3 Protocole de gestion**

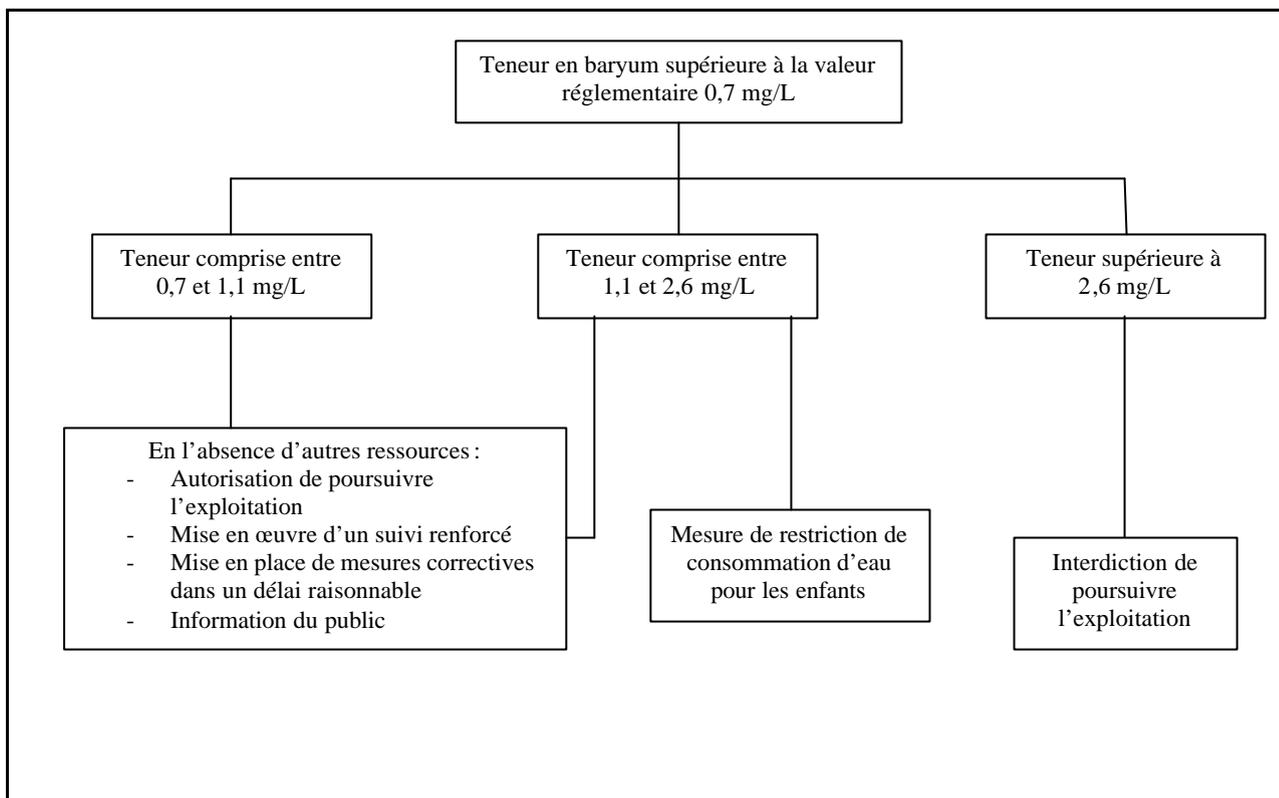
L'évaluation des risques menée a permis de calculer des teneurs de baryum dans l'eau aboutissant à des quotients de danger supérieurs à 1 traduisant des situations qualifiables d'inacceptable d'un point de vue sanitaire. Les résultats sont rappelés dans le tableau suivant :

**Tableau 21 : Récapitulatif des résultats de l'évaluation des risques**

	<b>Population</b>	<b>[Ba] critique mg/L</b>
VTR (US EPA)	adulte	2,6 < [Ba] < 4,6
	enfant	1,1 < [Ba] < 2,3

A partir de ces résultats, nous avons décidé de proposer un protocole de gestion des dépassements de la teneur réglementaire en baryum des eaux destinées à la consommation humaine à savoir 0,7 mg/L.

La figure suivante présente de manière schématique ce protocole :



**Figure 7 : Schéma du protocole de gestion des dépassements**

Les deux valeurs seuils choisies correspondent donc aux deux teneurs pour lesquels les quotients de danger deviennent supérieurs à 1 dans les scénarios maximalistes de consommation d'eau (95<sup>ème</sup> percentile – adulte 2,6 mg/L – enfant 1,1 mg/L).

## **CONCLUSION**

L'exposition des populations au baryum se fait essentiellement par l'alimentation et l'ingestion d'eau.

La contamination des eaux par le baryum est essentiellement d'origine naturelle et liée au contexte géologique.

L'objectif de cette étude était de réaliser une évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition au baryum afin de proposer une aide à la gestion des dépassements de la teneur réglementaire de 0,7 mg/L dans l'eau d'adduction.

Il ressort de cette étude :

- un manque de consensus entre les différents organismes dans la définition d'une valeur toxicologique de référence liée à une exposition par voie orale au baryum,
- une incertitude importante quant à la définition des situations à risque, en partie liée à ce qui vient d'être évoqué,
- l'importance relative de l'exposition au baryum via l'alimentation.

Par conséquent, la mise en place d'un mode de gestion des dépassements de la teneur réglementaire s'est avérée difficile.

Des mesures visant à réduire l'exposition des populations sont envisageables telles que l'élimination du baryum ou la diversification de la ressource. Mais ces dernières ne sont pas toujours accessibles aux petites collectivités, ainsi il est important de mieux caractériser le risque. Pour cela, une détermination plus précise des apports de baryum par l'alimentation serait à engager. De même, nous préconisons un approfondissement des connaissances relatives à la toxicologie du baryum. La détermination des seuils critiques comme les NOAEL et surtout les LOAEL est tout à fait nécessaire à la fois pour garantir un niveau élevé de sécurité pour les consommateurs et pour proposer des limites de qualité raisonnables techniquement et économiquement.

---

## **Bibliographie**

---

Arnich N., Grimault G., Joyeux M. *Evaluation des risques sanitaires liés aux situations de dépassements des limites et références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine*, AFSSA, septembre 2004

ATSDR, US Public Health Service, *Toxicological Profile for Barium and compounds*, July 1992

Barbier J. et Chéry L. (Mars 1999) – *Origine des éléments indésirables ou toxiques dans les eaux souterraines. Réalisation d'un inventaire national et essai d'identification de l'origine des teneurs anormales*. Rap. BRGM R 40448, 62 p.

Barbier J., Chéry L. (Juin 1997) - *Relation entre fond géochimique naturel, teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux (antimoine, arsenic, baryum, chrome, nickel, plomb, zinc. Application (Auvergne, Limousin), validation*. Rap. BRGM R 39544, 51 p.

Chéry L., Gateau C. (Novembre 1998) - *Mise à disposition de l'inventaire géochimique sur le territoire national (pour identifier les zones à risques de teneurs naturelles élevées en métaux lourds dans les eaux destinées à l'AEP)* - Rap. BRGM R 40207, 27p.

Gormican A. *Inorganic elements in foods used in hospital menus*, Journal of the American Dietetic Association, 1970, 56 : 397-403

OEHHA, *Public Health Goals for Chemicals in Drinking Water, Barium*, 2003

INRS, Fiche toxicologique n°125, *Baryum et composés*, 4<sup>ème</sup> trimestre 2001

IPCS, *Barium and salts*,

IPCS, *Environmental Health Criteria 107 – barium*, 1990

Meyer N., Helynck B., Ledrans M., Le Goaster C., Kintz P., Michel A., *Evaluation de l'exposition à l'arsenic de la population de Ferrette, France 1997*. Rev. Epidém. Et santé Pub., 1999 ; 47 : 315-321

Santé Canada, *Le Baryum*, 1990

SDEA, Saverne – Puits de Moulin-Champagne, *Essais d'élimination du baryum*, rapport RH/97-31, IRH Environnement, octobre 1997

US EPA, *Drinking Water criteria document for barium*, 1985

US EPA, *Toxicological review of barium and compounds*, in support of summary information on the Integrated Risk Information System, 1999

US Geological Survey Minerals yearbook, *Barite*, 2001

WHO, *Barium in drinking water, Background document for development of WHO Guidelines for drinking water quality*, 2004

WHO, *Guidelines for drinking water quality, 2<sup>nd</sup> Ed, vol 2, Health criteria and other supporting information*, 1996

Ysart G, Miller P, Crews H, Robb P, Baxter M, De L'Argy C, Lofthouse S, Sargent, C, Harrison N. *Dietary exposure estimates of 30 elements from the UK Total Diet Study*, Food Addit Contam, 1999 ; 16(9) : 391-403

Matthes Georg, *The properties of groundwater*, 1982

---

## **Liste des annexes**

---

Annexe 1 : Avis rendus par le CSHPF ou par l'AFSSA relatifs aux non conformités en baryum dans l'eau distribuée

Annexe 2 : Caractéristiques des dérivés du baryum

Annexe 3 : Usages du baryum et de ses dérivés

Annexe 4 : Teneurs moyenne en baryum dans les eaux distribuées en France

Annexe 5 : Consommations alimentaires (en g/j) des français d'après l'enquête INCA 1999

Annexe 6 : Teneurs moyennes de baryum dans les aliments d'après les études Ysart G et al. (1994) et Gormican (1970)



**Annexe 1 : Avis rendus par le CSHPF ou par l'AFSSA relatifs aux non conformités en baryum dans l'eau distribuée**

- Demande d'avis sur la présence de baryum dans les eaux distribuées par le syndicat intercommunal des eaux du Hurepoix (Essonne), séance du 17 mars 1998.
- Demande d'avis sur la présence de baryum dans les eaux distribuées par le syndicat intercommunal des eaux de la région de Saverne-Marmoutier (Bas-Rhin), séance du 19 octobre 1999.
- Demande d'autorisation d'utiliser l'eau brute du captage de la gare présentant des teneurs élevées en ammonium, baryum et chlorures pour l'alimentation en eau de la commune de Fourques (Gard), séance du 08 octobre 2002.
- Demande d'avis sur les risques liés à la présence de baryum dans l'eau du captage de la "Source des Filières" alimentant la commune de Moriviller (Meurthe-et-Moselle), Saisine n° 2002-SA-0249, avis du 20 mai 2003.

## Annexe 2 : Caractéristiques des dérivés du baryum

Composé	Masse moléculaire	Densité	Solubilité dans l'eau <sup>b</sup> (g/L)	Point de fusion <sup>c</sup> (°C)	Point d'ébullition (°C)
acétate	255.45	2.468	58.80	-	-
arséniate	689.83	5.10	0.55	1605	-
carbonate	197.37	4.43	0.02	1790 (90)	-
chlorure	208.25	3.856	375 (26)	962	1560
chromate	253.32	4.498	0.0034 (16)	-	-
fluorure	175.34	4.89	1.2 (25)	1375	2137
hydroxyde x 8H <sub>2</sub> O	315.47	2.18	56 (15)	78	78 (-8H <sub>2</sub> O)
nitrate	261.38	3.24	87	592	<sup>d</sup>
oxalate	225.35	2.658	0.093 (18)	400 <sup>d</sup>	-
oxyde	153.36	5.72	34.8	1918	ca.2000
phosphate, dibasique	233.5	4.165	0.1-0.2	410 (710) <sup>d</sup>	-
triphosphate	601.93	4.10	insoluble	-	-
sulfate	233.4	4.5	0.002	1580	-

<sup>a</sup> CRC (1988).

<sup>b</sup> entre parenthèse est donnée la température lorsque la mesure n'a pas été faite à 20 °C.

<sup>c</sup> la pression est donnée entre parenthèse lorsque la mesure n'a pas été faite à 760 mm Hg.

<sup>d</sup> décomposition.

### Annexe 3 : Usages du baryum et de ses dérivés

(Haguenoer & Furon, 1981)

#### Le métal:

- Alliage avec l'aluminium ou le magnésium pour la fabrication de piègeurs à gaz dans les tubes électroniques.
- Alliage avec le nickel pour l'industrie automobile.
- Porteur pour le radium.
- Extincteur pour les feux d'uranium ou de plutonium.

#### Les oxydes:

- L'oxyde, BaO, sous forme poreuse, permet de sécher les gaz et les solvants (pétrole, alcool divers). Il est utilisé dans la fabrication d'huile et de lubrifiant.
- L'hydroxyde, Ba(OH)<sub>2</sub>, est utilisé dans la fabrication du verre, dans la vulcanisation du caoutchouc, comme inhibiteur de corrosion, comme lubrifiant, dans le raffinage des huiles minérales et végétales, dans l'industrie du sucre.
- Le peroxyde, BaO<sub>2</sub>, est employé dans le blanchiment des fibres textiles et de la paille, dans la fabrication de l'eau oxygénée, pour amorcer les combustions dans les bombes calorimétriques ou en aluminothérapie, dans les cathodes et comme agent d'oxydation en synthèse organique.

#### Les sels:

- L'acétate, Ba(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>, entre dans la composition de lubrifiants. Il sert de catalyseur en synthèse organique et comme mordant d'impression dans le textile.
- Le benzène sulfonate est utilisé comme additif aux huiles de lubrification.
- Le bromate, Ba(BrO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, sert à préparer les bromates de terres rares et comme inhibiteur de corrosion dans les aciers à faible teneur en carbone.
- Le bromure, BaBr<sub>2</sub>, entre dans la préparation de substances phosphorescentes.
- Le carbonate, BaCO<sub>3</sub>, est employé sous forme d'appâts comme raticide et corvicide. Il entre dans la fabrication de tuiles, de briques, de céramiques, émaux, peintures et dans l'industrie du verre pour obtenir des verres lourds à indice de réfraction élevé. Il entre comme charge dans la fabrication du papier. Il est enfin utilisé dans des électrodes, des verres optiques et comme réactif analytique.
- Le chlorate, BaClO<sub>3</sub>, sert en pyrotechnie (feux de Bengale verts), mais est aussi utilisé dans la fabrication d'allumettes et explosifs. C'est un mordant en teinturerie.
- Le chlorure, BaCl<sub>2</sub>, est utilisé dans l'industrie des pigments, des laques, du verre. En teinturerie, il est utilisé comme mordant, comme charge et pour teinter les fibres textiles. Il sert dans le raffinage de l'aluminium, le tannage des cuirs, la fabrication du chlore et de la soude. Il a aussi été utilisé en médecine vétérinaire mais des accidents foudroyants ont été observés à la dose de 300 mg en intra-veineux direct chez le cheval.

- Le chromate,  $\text{BaCrO}_4$ , est un pigment anticorrosion pour les métaux, mais il entre aussi dans les peintures d'art, dans la coloration du verre, des céramiques et de la porcelaine.
- Le cyanure,  $\text{Ba(CN)}_2$ , est utilisé dans certains bains d'électrometallurgie.
- Le fluorure,  $\text{BaF}_2$ , sert à opacifier les émaux, dans la fabrication de verres, dans l'embaumement.
- L'hypophosphite,  $\text{Ba(PO}_2\text{H}_2)_2$ , est utilisé dans le nickelage.
- Le manganate,  $\text{BaMnO}_4$ , est un pigment utilisé dans les peintures sur fresque.
- Le nitrate,  $\text{Ba(NO}_3)_2$  est utilisé en pyrotechnie (pour faire des signaux de secours verts), et dans l'industrie des tubes à vide.
- Le nitrite,  $\text{Ba(NO}_2)_2$ , permet des réactions de diazotation. C'est un agent anticorrosif. Il est utilisé dans les explosifs.
- Le perchlorate,  $\text{Ba(ClO}_4)_2$ , permet la détermination de la ribonucléase. C'est un absorbant pour l'eau dans le dosage du C et de H.
- Le phosphate,  $\text{BaPO}_4\text{H}$ , est employé comme substance ignifuge et dans la fabrication d'objets phosphorescents.
- Le platino-cyanate,  $\text{BaPt(CN)}_4$ , est utilisé pour faire des écrans aux rayons X en radiographie.
- Le séléniure,  $\text{BaSe}$ , est employé dans l'industrie des semi-conducteurs et des cellules photoélectriques.
- Le siliciure,  $\text{BaSi}_2$ , permet de désoxyder et de désulfurer les acides.
- Le stéarate, est utilisé comme stabilisant dans l'industrie des revêtements plastiques.
- Le sulfate,  $\text{BaSO}_4$ , entre dans la fabrication du papier photographique, de la cellophane, du caoutchouc, des résines, des fibres synthétiques, des encres pour lithographie, de l'ivoire artificielle. Ce sulfate étant insoluble même en milieu acide il est employé comme produit de contraste aux rayons X, lors des explorations du tube digestif, par voie orale ou en lavement. Il est incorporé à la plupart des dispositifs intra-utérins.
- Le sulfure,  $\text{BaS}$ , permet d'obtenir des objets phosphorescents. Il entre dans la fabrication de la lithopone et la vulcanisation du caoutchouc. Il est parfois utilisé comme dépilatoire.
- Le thiocyanate,  $\text{Ba(SCN)}_2$ , est utilisé en teinturerie, photographie, comme agent dispersant pour la cellulose.
- Le thiosulfate (hyposulfite),  $\text{BaS}_2\text{O}_3$ , sert dans la fabrication d'allumettes, d'explosifs, dans certains procédés photographiques et en chimie analytique.
- Le titanate,  $\text{BaTiO}_3$ , est utilisé dans l'industrie électronique.

- L'uranate,  $BaU_2O_7$ , est utilisé en peinture sur porcelaine. Les dérivés du baryum sont également utilisés dans la fabrication de ciments spéciaux, et pour la protection contre les rayonnements ionisants. Certains composés sont utilisés dans l'industrie des matières plastiques. Ce sont des agents stabilisants qui empêchent la polymérisation spontanée ou la dégradation des polymères (thermodégradation, photodégradation, vieillissement). Parmi ces composés on trouve en particulier des sels d'acides gras de baryum.

#### Annexe 4 : Teneurs moyenne en baryum dans les eaux distribuées en France

(eaux ont la teneur est supérieure ou égale à 0.6 mg/L – valeurs moyennes 1996-2004

Ministère de la Santé – DDASS – SISE-Eaux - Production)

Dpt	Nom UDI	Pop	Nom commune	Min	Max	Moy.
4	VILLENEUVE	2964	VILLENEUVE	0,810	0,810	0,810
7	LES OLLIERES LES SCEAUTEAUX	30	PRANLES	0,779	0,796	0,788
	LES OLLIERES VILLAGE	700	LES OLLIERES-SUR-EYRIEUX	0,927	0,927	0,927
	PRANLES LA PIZE	58	PRANLES	0,830	1,100	0,947
24	SIGOULES CABANES	1839	SAINT-LAURENT-DES-VIGNES	0,980	0,980	0,980
30	FOURQUES	2600	FOURQUES	1,300	1,700	1,500
33	SAINT MACAIRE	1541	SAINT MACAIRE	2,000	2,000	2,000
36	AUZON CROZON	558	CROZON SUR VAUVRE	0,660	0,680	0,670
	LA PHILIPPIERE MIGNE	296	MIGNE	0,600	0,600	0,600
41	CHAUMONT SUR THARONNE	1072	CHAUMONT-SUR-THARONNE	0,660	0,690	0,675
45	ARDON	851	ARDON	0,654	0,729	0,692
48	BOUDOUX BAS	43	GREZES	0,904	0,904	0,904
	COULAGNES	22	SAINT LEGER DE PEYRE	0,760	0,760	0,760
	FREISSINET	6	SAINT JULIEN DU TOURNEL	0,950	0,950	0,950
	GREZES	40	GREZES	0,905	0,905	0,905
	LA BRAGOUZE	16	GATUZIERES	0,764	0,764	0,764
	LACHAMP	119	LACHAMP	0,852	0,852	0,852
	MONTRODAT	585	MONTRODAT	0,735	1,060	0,885
	SAINT LEGER DE PEYRE	60	SAINT LEGER DE PEYRE	0,710	0,710	0,710
	SERVIERES	25	SERVIERES	0,775	0,973	0,874
	VALLADOU	18	MONTRODAT	1,071	1,071	1,071
	VEYRAC	6	GREZES	0,976	0,976	0,976
	VIMENET.M	308	MONTRODAT	1,050	1,050	1,050
	54	MORIVILLER	84	MORIVILLER	0,610	0,940
66	LA BASTIDE	61	LA BASTIDE	1,250	1,250	1,250
67	KOCHERSBERG-OUEST-S283	7874	COSSWILLER	0,600	0,722	0,664
	SDE SAVERNE-MARMOUT. SUD-S222	4142	MARMOUTIER	0,633	0,633	0,633
	SIVOM DIEMERINGEN OUEST - S031	4310	WALDHAMBACH	0,620	0,730	0,670
68	GUEBERSCHWIHR	816	GUEBERSCHWIHR	0,680	0,680	0,680
	UFFHOLTZ	1403	UFFHOLTZ	0,630	0,630	0,630
70	SIAEP DE HAUTEVELLE	387	HAUTEVELLE	0,633	0,690	0,662
84	ADDUC.SORGUES BAS SERVICE	56700	SORGUES	0,830	0,830	0,830
88	BELLEFONTAINE	856	BELLEFONTAINE	0,710	0,710	0,710
	HARSAULT	301	HARSAULT	1,013	1,670	1,352
	HAUTMOUGEY	134	HAUTMOUGEY	0,700	0,794	0,747
	HENZEZEL	433	HENZEZEL	0,888	1,000	0,944
	MAGNY (LE)	32	MAGNY (LE)	0,810	0,810	0,810
	RESEAU ARPENTS	953	PLOMBIERES-LES-BAINS	0,810	0,810	0,810
	RESEAU CENTRE LA CHAPELLE	545	CHAPELLE AUX BOIS (LA)	0,700	0,700	0,700
	RESEAU FONTAINE RENARD	220	CLERJUS (LE)	0,760	0,760	0,760
	RESEAU OUTREMONT	150	VAL D'AJOL (LE)	0,800	0,800	0,800
	RESEAU TUILERIES	565	FONTENOY-LE-CHATEAU	0,900	0,900	0,900
	SDE VOIVRES-CHAPELLE-HARSAULT	481	VOIVRES (LES)	0,820	0,939	0,880

91	BRIIS-LAUNAY MARECHAUX	150	BRIIS SOUS FORGES	0,700	0,700	0,700
	CAMPING LA PRAIRIE DU MOULIN 9	???	OLLAINVILLE	0,600	0,600	0,600
	CAMPING LES LONGS CHAMPS	???	SAINT MAURICE MONTCOURONNE	0,600	0,600	0,600
	CERNY-BOINVAU/ORGEMONT	200	CERNY	0,990	0,990	0,990
	HUREPOIX BALLANCOURT-ITTEVILLE	8424	ITTEVILLE	0,990	0,990	0,990
	HUREPOIX BOIS BLANCS	39566	ARPAJON	0,600	0,700	0,667
			AVRAINVILLE	0,600	0,600	0,600
			BOISSY SOUS SAINT YON	0,600	0,600	0,600
			BREUILLET	0,600	0,700	0,650
			BREUX JOUY	0,600	0,600	0,600
			CHEPTAINVILLE	0,600	0,700	0,631
			EGLY	0,600	0,600	0,600
			LEUDEVILLE	0,600	0,600	0,600
			LEUVILLE SUR ORGE	0,600	0,700	0,625
			MAROLLES EN HUREPOIX	0,600	0,700	0,650
			NORVILLE (LA)	0,600	0,700	0,650
			OLLAINVILLE	0,700	0,700	0,700
			SAINT GERMAIN LES ARPAJON	0,600	0,700	0,625
			SAINT SULPICE DE FAVIERES	0,600	0,600	0,600
			SAINT YON	0,600	0,700	0,633
			VERT LE GRAND	0,600	0,600	0,600
	HUREPOIX JUINE	4135	SAINT VRAIN	0,670	0,990	0,830
	SAINT CHERON HAUT (BAVILLE..)	411	SAINT CHERON	1,200	1,200	1,200
	SI ANGERVILLIERS EST	8852	BRUYERES LE CHATEL	0,600	0,700	0,650
			COURSON MONTELOUP	0,900	0,900	0,900
			FONTENAY LES BRIIS	0,600	0,700	0,650
			FORGES LES BAINS	0,700	0,700	0,700
			SAINT MAURICE MONTCOURONNE	0,600	0,600	0,600
	SI ANGERVILLIERS OUEST ST CYR	3404	VAL SAINT GERMAIN (LE)	1,070	2,200	1,635
	VALLEE DE LA JUINE (RESEAU)	9129	AUVERS SAINT GEORGES	1,770	1,770	1,770
			BOURAY SUR JUINE	0,657	1,120	0,954
			JANVILLE SUR JUINE	0,750	2,700	1,503
			LARDY	0,700	1,130	0,980
971	SAINTE-ROSE BELLEVUE	1705	SAINTE-ROSE	1,000	1,000	1,000
02A	ARIOLA	6	ZEVACO	1,000	1,000	1,000

## Annexe 5 : Consommations alimentaires (en g/j) des français d'après l'enquête INCA 1999

Tableau 22 : Résultats de l'enquête INCA 1999 (AFSSA/CRÉDOC/DGAL) pour les adultes

Produits	15-24 ans	25-44 ans	45-64 ans	65 ans et plus	Ensemble
Pain biscottes	83,7	119	138,3	146,5	122,6
Pâtes	45,1	37,3	34,7	26	36,1
Riz et semoule	24	24,3	18,9	12	20,8
Viennoiseries	24,3	21,6	11	9,9	17,3
Biscuits	19,2	15,3	10,6	10,1	13,9
Pâtisseries	33,8	33,9	40,8	34,8	35,8
Lait	146,7	124,2	96,1	117	119,5
Ultra frais laitier	76,2	78,5	70,7	75,3	75,5
Fromages	26	40,1	44,7	42,3	39,3
Oeufs et dérivés	15,9	16,2	23,4	17,8	18,3
Beurre	11,1	13,8	14,3	14,7	13,6
Viandes	61,3	60	63,3	50,8	59,6
Volailles et gibiers	31,1	37,4	43,8	31,1	37
Charcuterie	32,9	41,3	41,1	32,9	38,4
Poissons	23	26,9	34,6	34,7	29,5
Légumes (hors pommes de terre)	93,9	116,4	146,4	128,5	122,5
Pommes de terre et dérivés	68,6	60,1	63,4	64,8	63,2
Légumes secs	8,1	10,7	12,4	8,2	10,3
Fruits	77,3	108,8	164,2	206	134,2
Sucres et dérivés	18,6	30,1	30,1	29	27,9
Eaux	570,2	574,2	541,5	526	556,9
Jus de fruits et sodas	200,2	106,8	53,7	52,2	99,8
Boissons alcoolisées	49,7	158,1	229,6	167,7	159,9
Café	66,1	228,5	254,2	188,5	200,7
Thé et boissons chaudes	34,6	65,7	108,1	76,6	73,3
Pizzas, quiches et tartes salées	36,1	27,8	16,6	11,4	23,6
Sandwiches	19,9	20,2	7,8	1,7	13,8
Soupes	44,1	56,6	110,9	162,3	86,4
Plats composés	88,9	93,8	67,1	56	79,6
Entremets	31,2	28,1	17,5	19,8	24,5
Compotes et fruits cuits	8,5	10,2	12	12,4	10,7

**Tableau 23 : Résultats de l'enquête INCA 1999 (AFSSA/CRÉDOC/DGAL) pour les enfants**

Produits	3-5 ans	6-8 ans	9-11 ans	12-14 ans	Ensemble
Pain biscottes	35,1	57,9	63,4	87,5	61,0
Pâtes	15,4	20,5	21,1	17,3	18,6
Riz et semoule	26,3	33	43,8	44,7	37,0
Viennoiseries	16,5	18,6	23,1	26,7	21,2
Biscuits	19,3	24,4	25,3	27,7	24,2
Pâtisseries	30,4	32,7	26,3	27,8	29,3
Lait	22,6	32,4	34,9	38,8	32,2
Ultra frais laitier	247,1	232	201,3	196,2	219,2
Fromages	89,6	86,2	67,3	63,4	76,6
Oeufs et dérivés	18,3	21,6	23,7	25,3	22,2
Beurre	9,4	11,8	13,4	11,5	11,5
Viandes	7,6	10,3	10,8	11,8	10,1
Volailles et gibiers	34,2	41,7	51,1	59,2	46,6
Charcuterie	17,5	23,5	31,5	29,9	25,6
Poissons	23,6	27,2	26,4	32,8	27,5
Légumes (hors pommes de terre)	17,8	21,1	21,1	21,2	20,3
Pommes de terre et dérivés	57,8	72,6	82,6	84,4	74,4
Légumes secs	44,4	56,1	67	73	60,1
Fruits	71,2	87,2	95,7	80,2	83,6
Sucres et dérivés	15,5	19	16,8	21,8	18,3
Eaux	180,3	173,6	198,5	236,8	197,3
Jus de fruits et sodas	0	0	0	0	0,0
Café	2,3	6,4	14,3	18,4	10,4
Thé et boissons chaudes	16,7	17,9	24,1	19,9	19,7
Pizzas, quiches et tartes salées	11,2	15,6	20,2	24,3	17,8
Sandwiches	5,6	8,1	11,5	15,5	10,2
Soupes	35,4	46,2	43,4	42,3	41,8
Plats composés	49	62,2	78,1	86	68,8
Entremets	36,2	30,2	36,3	28,1	32,7
Compotes et fruits cuits	10,8	12,6	10,7	8,9	10,8

**Annexe 6 : Teneurs moyennes de baryum dans les aliments  
d'après les études Ysart G et al. (1994) et Gormican (1970)**

**Tableau 24 : Dietary exposures of consumers to 30 elements  
UK Total Diet Study ( Ysart G et al., 1994)**

<b>Food group</b>	<b>Ba (mg/kg)</b>
Bread	1.0
Misc. cereals	0.79
Carcase meat	0.05
Offal	0.07
Meat products	0.27
Poultry	0.02
Fish	0.18
Oils & fats	0.03
Eggs	0.47
Sugars & preserves	0.84
Green vegetables	0.38
Potatoes	0.16
Other vegetables	0.50
Canned vegetables	0.27
Fresh fruit	0.35
Fruit products	0.28
Beverages	0.06
Milk	0.07
Dairy produce	0.31
Nuts	56

**Tableau 25 : Barium contents of some common foods(Gormican, 1970)**

Food	Barium content (mg/100 g)
<b>Beverages and dietary concentrates</b>	
Chocolate syrup	0.17
Coffee	
Instant, dry	0.36
Ground, dry	0.32
Beverage, brewed	<0.008
Cocoa, dry	1.2
Meritene, plain flavour, dry	0.11
Sustagen, imitation vanilla flavour	0.056
Tea, orange pekoe	
Bag, dry	2.7
Beverage, steeped	<0.004
<b>Breads, cereal products, crackers, and pastas</b>	
Bread	
Rye	0.062
White	0.051
Whole wheat	0.11
Bran flakes, 40%	0.39
Cheerios (cereal)	0.13
Corn flakes (cereal)	0.04
Crackers	
Graham	0.11
Saltines	0.04
Egg noodles, uncooked	0.16
Macaroni, uncooked	0.11
Oatmeal, rolled oats (quick), uncooked	0.11
Puffed Rice	<0.04
Quick Cream of Wheat (cereal)	
Enriched, uncooked	0.2
Regular, uncooked	0.15
Rice Krispies	<0.04
Rice, white uncooked	<0.04
Shredded Wheat	0.22
Wheaties (cereal)	0.14
Spaghetti, uncooked	0.11
<b>Cheese</b>	
American	0.12
Cottage, creamed	<0.04
Swiss	0.22
<b>Eggs</b>	
Whole	0.76
White	<0.01
Yolk	0.058
<b>Milk</b>	
Nonfat solids	<0.08
Fluid	
Whole	<0.01
Skim	<0.01
Buttermilk	<0.01
Ice cream, vanilla	<0.01
Sherbet, orange	<0.01

Food	Barium content (mg/100 g)
<b>Fruits and fruit juices</b>	
Apple	
Raw, unpeeled	0.075
Juice, canned	<0.002
Sauce, canned, drained	<0.01
Apricots, canned, drained	<0.01
Banana, ripe	<0.01
Blueberries, waterpack, drained	0.014
Cantaloupe	<0.01
Cherries, Royal Anne, canned, drained	0.029
Grapes	
Fresh, with peel	<0.05
Juice, canned	0.023
Grapefruit	
Juice, canned	<0.008
Sections	
Fresh, skinless	<0.01
Canned, drained	<0.01
Orange	
Juice, frozen, reconstituted	<0.008
Sections, skinless	<0.008
Pineapple	
Crushed, canned, drained	0.014
Juice, canned	0.008
Peach, cling, canned, drained	<0.01
Pear, canned, drained	0.047
Prunes	
Cooked	0.064
Juice	0.014
Watermelon	0.022
<b>Meat, poultry, fish, and shellfish</b>	
Beef, fresh, uncooked	
Flank, round, rump, sirloin, or tenderloin	<0.02
Ground	<0.02
Liver	<0.04
Lamb, fresh, uncooked	
Chop	<0.02
Leg	<0.02
Luncheon meat, big bologna	<0.02
Pork, fresh, uncooked	
Bacon	<0.04
Ham	<0.02
Liver	<0.04
Loin	<0.02
Veal, fresh, uncooked	
Round or steak	<0.02
Poultry, uncooked	
Chicken, roaster	
Dark meat	<0.02
White meat	<0.02
Turkey, roaster	
Dark meat	<0.02
White meat	<0.02
Fish and shellfish	
Crab, haddock, salmon, sockeye, sole, or tuna	<0.02
Shrimp	<0.02

Food	Barium content (mg/100 g)
<b>Nuts</b>	
Peanuts	
Butter	<0.04
Salted, blanched	0.21
Pecans	0.67
Walnuts	0.072
<b>Sugars and flours</b>	
Sugar	
Brown	<0.04
Powdered	<0.04
White	<0.04
Flour, bleached, enriched	0.072
<b>Vegetables</b>	
Asparagus spears, frozen, uncooked	<0.02
Beans	
Baked with pork	<0.02
Green, frozen, uncooked	0.16
Lima, baby, uncooked	0.031
Wax, canned, salt-free, drained	0.11
Beets, canned, salt-free, drained	0.26
Broccoli, frozen, uncooked	<0.02
Brussels sprouts, frozen, uncooked	<0.02
Cabbage, uncooked	<0.02
Carrots, uncooked	0.052
Cauliflower, frozen, uncooked	<0.02
Celery, fresh	<0.02
Corn, whole kernel, canned, salt-free, drained	<0.02
Cucumber	<0.02
Lettuce	<0.02
Mushrooms, stems and pieces, canned	<0.02
Onions, fresh, mature	0.053
Peas, canned, salt-free, drained	<0.02
Potato	
Fresh, uncooked	<0.02
Instant, uncooked	0.056
Pumpkin, canned	0.053
Spinach, frozen, uncooked	0.04
Squash, frozen, cooked	0.083
Sweet potatoes, canned	0.22
Tomato	
Fresh	<0.02
Juice, canned, salt-free	<0.008