

Document public



# Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse

Rapport de phase 1  
Recueil des données et des informations



*La source ferrugineuse d'Orezza en Corse*

**BRGM/RP-54031-FR**  
Septembre 2005

# Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse

Rapport de phase 1  
Recueil des données et des informations

**BRGM/RP-54031-FR**  
Septembre 2005

R. Sonney, A. Blum, L. Chery

**Vérificateur :**

Nom : E. Petelet - Giraud

Date : 18 août 2005

Signature :

Original signé par le vérificateur

**Approbateur :**

Nom : T. Pointet

Date :

Signature :

Original signé par l'approbateur

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

**Mots clés** : bassin Rhône-Méditerranée et Corse, éléments traces, fond géochimique, cours d'eau, eaux souterraines, Directive Cadre sur l'Eau, AEP.

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

Sonney R., Blum A., Chery L. (2005) - Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 1. Recueil des données et des informations. Rapport BRGM RP-54031-FR, 135 p.



## Synthèse

La **Directive Cadre sur l'Eau** 2000/60/CE demande aux Etats Membres d'évaluer l'état de leurs masses d'eau souterraine et de surface. Mais l'évaluation du bon état chimique des masses d'eau nécessite de bien connaître les fonds géochimiques naturels de manière à distinguer les éléments traces naturellement présents dans le milieu de ceux résultant des activités humaines.

Par ailleurs un certain nombre d'éléments traces posent problème pour l'utilisation de la ressource pour l'usage « **alimentation en eau potable** » (AEP) au delà des seuils imposés par la réglementation, il est donc intéressant d'apprécier les niveaux des fonds géochimiques naturels pour ces éléments.

C'est dans ce contexte et pour répondre à ces besoins que l'Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée & Corse a demandé au BRGM d'identifier les zones dans lesquelles les eaux (eaux souterraines et eaux de surface) sont susceptibles de présenter un fond géochimique élevé pour les éléments traces. Par éléments traces, on entendra ici tous les éléments considérés comme toxiques ou indésirables par la Directive « Eau potable » 98/60/CE et par son décret d'application en droit français (n°1220 du 20 décembre 2001) à savoir : l'arsenic, le baryum, le bore, le fluor, le cadmium, le chrome, le mercure, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc, l'antimoine, le sélénium, l'aluminium, l'argent, le fer et le manganèse. Quatre de ces substances font également partie de la liste des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau. Il s'agit du cadmium, du nickel, du mercure et du plomb.

Le présent rapport fait état des travaux réalisés dans la **première phase de l'étude** dont l'objectif est double. Il s'agit d'une part de collecter toutes les données brutes qui seront utiles à la délimitation des zones dont les eaux sont susceptibles de présenter un fond géochimique élevé et d'autre part de réaliser une synthèse bibliographique sur les occurrences en éléments traces dans les eaux souterraines et les eaux de surface du bassin Rhône – Méditerranée & Corse.

Les **données brutes** recueillies sont issues de différentes bases de données et représentent différents niveaux d'information. Ces données sont : des analyses chimiques dans les eaux souterraines (depuis la banque ADES mais également auprès des DDASS), des analyses chimiques réalisées sur les cours d'eau du bassin (sur eau, matières en suspension, bryophytes et sédiments), des données sur les éléments traces dans les sols (bases BDAT et ANADEME) et les fines d'alluvions (BRGM, inventaire géochimique national), des indices miniers (BRGM).

Une recherche exhaustive des **références bibliographiques** traitant des occurrences en éléments traces dans les eaux du bassin ou dans des eaux de contexte équivalent a permis d'identifier pour chaque secteur du bassin les éléments susceptibles d'être présents. Ainsi, bien que le fer et le manganèse soient les éléments les plus couramment rencontrés à l'état naturel (dans les eaux souterraines en particulier), il ne

faut pas exclure d'autres occurrences significatives comme celles du baryum (dans les carbonates comme dans les régions de socle), du zinc, du fluor (dans les régions de socle en particulier), et de l'arsenic et de l'antimoine dans les massifs cristallins (Alpes internes, Corse alpine, Massif Central, Pyrénées). Avec des probabilités plus faibles, d'autres éléments sont susceptibles d'être présents. Il s'agit du cuivre (dans les carbonates comme dans les zones de socle), du chrome ou encore de l'aluminium. Pour ces substances les concentrations potentielles sont toutefois très basses.

## Sommaire

<b>Synthèse</b> .....	<b>3</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>5</b>
Liste des figures .....	<b>7</b>
Liste des tableaux .....	<b>8</b>
Liste des abréviations.....	<b>9</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Présentation du bassin Rhône - Méditerranée &amp; Corse</b> .....	<b>13</b>
1.1. LE BASSIN RHÔNE-MEDITERRANEE & CORSE ADMINISTRATIF, GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE .....	13
1.1.1. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse administratif .....	13
1.1.2. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse géographique .....	13
1.1.3. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse géologique.....	14
1.2. LA SECTORISATION DU BASSIN RHÔNE – MEDITERRANÉE & CORSE EN FONCTION DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE .....	15
1.2.1. Pourquoi cette sectorisation ? .....	15
1.2.2. Quelles sont ces unités ? .....	15
<b>2. Le rassemblement des données et des informations disponibles</b> .....	<b>20</b>
2.1. LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	20
2.1.1. L'utilité de la recherche bibliographique .....	20
2.1.2. La stratégie employée pour cette recherche .....	21
2.1.3. Liste des mots clés les plus employés .....	22
2.2. LES DONNÉES BRUTES.....	23
2.2.1. Les eaux souterraines .....	23
2.2.2. Les eaux de surface .....	23
2.2.3. Le sol .....	24
2.2.4. L'inventaire géochimique national .....	26
2.2.5. Les gîtes miniers .....	28
2.2.6. Les données de l'atlas géochimique européen FOREGS.....	29

<b>3. Les résultats de la recherche bibliographique – Bilan des occurrences par secteur.....</b>	<b>33</b>
3.1. LES ALPES EXTERNES SEDIMENTAIRES .....	35
3.2. LES ALPES INTERNES ET MASSIFS CRISTALLINS EXTERNES.....	42
3.3. LE BASSIN MOLASSIQUE LÉMANIQUE .....	49
3.4. LES BASSINS TERTIAIRES DU SILLON SAÔNE – RHÔNE ET BAS DAUPHINÉ (BRESSE, DOMBES, BAS DAUPHINÉ) .....	51
3.5. LES BASSINS TERTIAIRES PROVENÇAUX.....	53
3.6. LA CORSE ALPINE .....	55
3.7. LA CORSE GRANITIQUE ET VOLCANIQUE.....	59
3.8. LA COUVERTURE LANGUEDOCIENNE .....	62
3.9. LE DELTA DU RHÔNE .....	69
3.10. LE JURA .....	70
3.11. LE MASSIF CENTRAL.....	74
3.12. LA MONTAGNE NOIRE.....	81
3.13. LE PLATEAU HAUT-SAÔNOIS ET LE MORVAN .....	85
3.14. LES PYRÉNÉES ORIENTALES .....	88
3.15. LES VALLÉES DU RHÔNE ET DE LA SAÔNE.....	92
3.16. LES MAURES ET L'ESTEREL .....	93
3.17. LE VOLCANISME DES COIRONS .....	95
3.18. LES VOSGES .....	97
3.19. AUTRES SECTEURS, AUTRES TYPES DE DONNÉES.....	99
<b>Conclusions .....</b>	<b>101</b>
<b>Bibliographie générale .....</b>	<b>105</b>
<b>Bibliographie par secteur.....</b>	<b>119</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Le bassin Rhône – Méditerranée & Corse et les départements français. ....	13
Figure 2 : Carte des principales unités géologiques du bassin RM & C.....	17
Figure 3 : Etat d'avancement de la BDAT. Source : GIS-Sol - INRA, 2005. ....	25
Figure 4 : Etat d'avancement de la BDETM. Source : GIS-Sol – INRA.....	26
Figure 5 : Départements du bassin RM&C pour lesquels des données de l'Inventaire géochimique national sont disponibles. ....	27
Figure 6 : pH des eaux de surface d'Europe. Source : FOREGS. ....	30
Figure 7 : Teneurs en arsenic dans les eaux de surface (à gauche) et dans les sédiments d'Europe (à droite). Source : FOREGS.....	31
Figure 8 : Teneurs en arsenic dans les sols supérieurs (à gauche) et dans les sols inférieurs d'Europe (à droite). Source : FOREGS. ....	31
Figure 9 : Teneurs en sélénium dans les eaux de surface d'Europe. Source : FOREGS. ....	32
Figure 10 : Teneurs en cuivre et en plomb dans les limons supérieurs d'Europe. Source : FOREGS.....	32
Figure 11 : Carte géologique des Alpes externes sédimentaire (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	36
Figure 12 : Carte géologique des Alpes internes et massifs cristallins externes (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	43
Figure 13 : Carte géologique du bassin molassique lémanique (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	50
Figure 14 : Carte géologique des bassins tertiaires du Sillon Saône – Rhône et Bas Dauphiné (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000). ....	52
Figure 15 : Carte géologique des bassins tertiaires provençaux (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	54
Figure 16 : Carte géologique de la Corse alpine (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	56

Figure 17 : Carte géologique de la Corse granitique et volcanique (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	59
Figure 18 : Carte géologique de la couverture languedocienne (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	63
Figure 19 : Carte géologique du delta du Rhône (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000). ....	69
Figure 20 : Carte géologique du Jura (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	71
Figure 21 : Carte géologique du Massif Central (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000). ....	75
Figure 22 : Carte géologique de la Montagne Noire (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000). ....	82
Figure 23 : Carte géologique du plateau haut-saônois et du Morvan (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	86
Figure 24 : Carte géologique des Pyrénées Orientales (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	89
Figure 25 : Carte géologique des Maures et de l'Esterel (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	94
Figure 26 : Carte géologique du Volcanisme des Coirons (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	96
Figure 27 : Carte géologique des Vosges (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).....	97

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres disponibles dans la base de données sur les eaux de surface de l'AERM&C.....	24
Tableau 2 : Eléments analysés dans le cadre de l'inventaire géochimique national et seuils de détection analytique, en spectrométrie à plasma DCP et ICP, et au quantomètre. Les valeurs sont en ppm (mg/kg ou µg/g), sauf quand il est spécifié qu'elles sont en %).....	28
Tableau 3 : Relation entre éléments traces dans les eaux souterraines et fond géochimique (d'après Blum et al., 2002). ....	34

Tableau 4 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le domaine des Préalpes. .....	41
Tableau 5 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le secteur des Alpes internes. ....	48
Tableau 6 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la Corse alpine.....	58
Tableau 7 : Relation entre lithologie et éléments traces pour la Corse granitique et volcanique .....	62
Tableau 8 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la couverture languedocienne. ....	68
Tableau 9 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur du Massif Central.....	81
Tableau 10 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la Montagne Noire.....	84
Tableau 11 : Les activités industrielles de la région lyonnaise et leurs polluants associés (d'après Busse, 1980). ....	93
Tableau 12 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur des Maures et de l'Esterel. ....	95
Tableau 13 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le secteur des Vosges. .....	98
Tableau 14 : Médianes des teneurs en fluorures dans les eaux de surface drainant différents types de roches. D'après Meybeck, 1984. ....	100
Tableau 15 : Médianes des teneurs en bore dans les eaux de surface drainant différents types de roches. D'après Meybeck, 1984. ....	100
Tableau 16 : Evaluation de la probabilité de la présence naturelle des éléments traces dans les eaux souterraines et les petits cours d'eau en fonction du contexte géologique dans le bassin Rhône – Méditerranée & Corse. ....	103

## Liste des abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ADES : Accès aux Données des Eaux Souterraines

AEP : Alimentation en Eau Potable

AERM & C : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse

AGI : American Geologic Institute

ANADEME : Analyses de l'ADEME

BDAT : Base de Données des Analyses de Terre

BDETM : Base de Données sur les Eléments Traces Métalliques

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

BSS : Banque du Sous-Sol

CSA : Cambridge Scientific Abstracts

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DCP : Direct Coupled Plasma

DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

EDYTEM : Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

FOREGS : FORum of European Geological Survey

GIS-Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

ICP : Inductively Coupled Plasma

ICP-MS : Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

RM & C : Rhône Méditerranée & Corse

RNB : Réseau National de Bassin

RNES : Réseau National de connaissance des Eaux Souterraines

SEQ : Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau

## Introduction

La mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE précise différentes exigences et notamment que « les Etats membres peuvent utiliser des typologies pour la caractérisation des eaux souterraines lorsqu'ils établissent des niveaux naturels pour ces masses d'eau souterraine » (Annexe II.2.2 de la DCE). Sa Directive fille sur les eaux souterraines, actuellement en négociation, renforce cette nécessité de connaître les états de référence géochimique des masses d'eau souterraines. Les Etats Membres, et plus précisément les districts hydrographiques chargés de la mise en œuvre de la Directive, devront en effet fournir pour chaque masse d'eau souterraine à risque des informations sur le bruit de fond géochimique (annexe III, partie B de la proposition de Directive de septembre 2003).

Pour les cours d'eau, les exigences sont les mêmes. L'évaluation du bon état chimique des cours d'eau nécessite de bien connaître les fonds géochimiques naturels de manière à distinguer les éléments traces naturellement présents dans le milieu de ceux résultant des activités humaines.

La mise en place ces dernières années de réseaux de mesure de la qualité des eaux souterraines en France, en particulier par les Agences de l'Eau, a montré combien il était difficile dans l'état actuel des connaissances d'évaluer les niveaux de référence géochimique des eaux des aquifères. L'élaboration du Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau ou SEQ (SEQ - cours d'eau et SEQ – eaux souterraines), qui sert notamment à traiter les données issues de ces réseaux, confirme cette difficulté.

Il est donc nécessaire d'améliorer la connaissance de l'état de référence des eaux naturelles pour un certain nombre d'éléments métalliques et minéraux (fond géochimique) pour être à même de faire la part des choses entre présence naturelle et apports anthropiques, de prévoir l'évolution à court et long terme de la qualité des eaux et se fixer des objectifs de qualité ou de restauration pertinents dans la recherche du « bon état qualitatif des aquifères » (Directive Cadre sur l'Eau).

Il n'existe pas de réponse unique pour qualifier une eau de « bonne qualité ». La qualité d'une eau souterraine se définit à partir de l'usage qu'on en fait. On peut cependant évaluer la qualité de l'eau par rapport à son état d'origine. L'altération de l'état chimique d'une eau souterraine est ainsi évaluée par rapport à l'état naturel en mesurant les principaux paramètres physico-chimiques responsables de la dégradation : nitrates, pesticides, micropolluants minéraux (arsenic, plomb,...), micropolluants organiques (hydrocarbures aromatiques, polycycliques, composés organo-halogénés volatils,...).

Par ailleurs un certain nombre de ces éléments posent problème pour l'utilisation de la ressource pour l'usage « alimentation en eau potable » (AEP) au delà des seuils imposés par la réglementation, il est donc intéressant d'apprécier les niveaux des fonds géochimiques naturels pour ces éléments.

C'est dans ce contexte et pour répondre aux besoins de l'Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée & Corse en matière d'identification des fonds géochimiques naturels dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin que cette étude a été réalisée. Celle-ci s'articule en trois phases :

- phase 1 : recueil des données et des informations disponibles :  
Cette phase a pour objectif de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible sur les niveaux de référence géochimiques des hydrosystèmes du bassin. Cet inventaire comportera un volet bibliographique ainsi qu'une collecte des données brutes utiles à la définition des fonds géochimiques.
- phase 2 : analyse des données existantes :  
L'ensemble des données et des informations collectées sera exploité de manière à identifier, pour les cours d'eau du bassin comme pour les eaux souterraines, les secteurs à risque de concentrations naturelles élevées en éléments métalliques.
- phase 3 : définition d'un programme d'acquisition de données :  
Au regard de tous ces résultats, des programmes d'acquisition de données seront établis de manière à d'une part mieux suivre les variabilités spatio-temporelles des substances présentes naturellement à des niveaux élevés, et d'autre part à affiner les connaissances dans les secteurs où un risque est supposé mais non vérifié compte tenu de l'insuffisance éventuelle des données disponibles.

Il est important de noter que dans cette étude, les eaux thermo-minérales et les exhaures de mines ne sont pas traités. Ces sujets représentent en effet des environnements très particuliers qui ne sont pas couverts par le contexte de ce projet (Directive Cadre sur l'Eau et eau potable).

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés dans la phase 1. Après une brève présentation du bassin Rhône – Méditerranée & Corse, la nature des données recueillies y sont exposées (données bibliographiques et données brutes). Une troisième partie, plus détaillée, est consacrée à l'exploitation des références bibliographiques collectées. Pour chaque secteur géologique du bassin, une présentation des éléments traces présents dans les roches et dans les eaux est proposée.

# 1. Présentation du bassin Rhône - Méditerranée & Corse

## 1.1. LE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE & CORSE ADMINISTRATIF, GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

### 1.1.1. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse administratif

Administrativement, il comprend les régions Franche-Comté, Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Corse et Languedoc-Roussillon ainsi que la moitié Est des départements de la Côte d'Or et de la Saône-et-Loire de la région Bourgogne. De plus, il est inclus dans ce secteur une petite partie des départements de la Lozère, de la Haute-Marne, de la Loire ainsi que des Vosges (Figure 1).

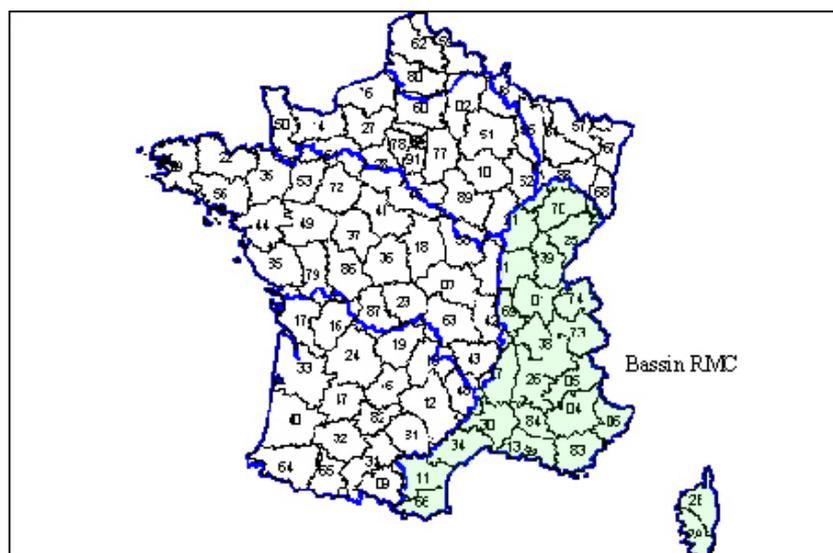


Figure 1 : Le bassin Rhône – Méditerranée & Corse et les départements français.

### 1.1.2. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse géographique

Le bassin Rhône – Méditerranée et Corse est le plus grand de la France (130 000 km<sup>2</sup>) après celui de Loire-Bretagne. Il s'étend sur la quasi totalité du quart Sud-Est de la France.

Géographiquement, il est constitué par le bassin versant de la Méditerranée ; autrement dit par tous les bassins versants des cours d'eau se jetant dans cette mer (y compris la Corse). De nombreux grands cours d'eau participent à l'évacuation des

eaux en direction de la Méditerranée comme le Rhône pour ne citer que le plus important.

Sur ces bordures se localise un certain nombre de massifs comme les Vosges au Nord, le Jura et les Alpes et Préalpes à l'Est, les Pyrénées au Sud et le Massif Central à l'Ouest. L'ensemble de ces massifs encadre des bassins sédimentaires aux altitudes plus basses, comme la Bresse, la Dombes, le Bas-Dauphiné et la Camargue ou encore les plaines du Roussillon et du Languedoc. Ces bassins se prolongent fréquemment en leur bordures par des plateaux qui forme transition avec les reliefs plus vigoureux, (plateaux de Haute Saône, de Bourgogne, du Vivarais, des Garrigues du Gard et de l'Hérault, ...).

Les précipitations sont inégalement réparties sur cet ensemble. Les régions montagneuses sont les plus arrosées avec un maximum pluviométrique annuel d'environ 2000 mm pour les massifs du Jura et des Cévennes. Les plaines de la vallée de la Saône et du Rhône, ainsi que le pourtour méditerranéen reçoivent le moins d'eau (moins de 1000 mm/an).

Le climat est lui aussi très diversifié. Il diffère sur l'ensemble du bassin RM & C : climat méditerranéen, montagnard, semi-océanique et continental. Les écarts entre les températures moyennes annuelles sont importants (supérieure à 15°C à Nice dans les Alpes maritimes et inférieure à 5°C à Morteau dans le Doubs).

Enfin, la répartition de l'habitat est irrégulière. La majorité des grandes villes se situent en bordure de la mer Méditerranée (Montpellier, Marseille, Toulon, Cannes, Nice, ...) et le long des cours d'eau les plus importants (Besançon, Macon, Lyon, Valence, Avignon, Grenoble...). Les secteurs les moins peuplés correspondent aux endroits où le relief est le plus marqué et les conditions naturelles moins favorables (Alpes, Corse...). Ainsi, l'impact anthropique n'est pas le même sur l'ensemble du bassin.

### **1.1.3. Le bassin Rhône-Méditerranée & Corse géologique**

Géologiquement, le bassin est très hétérogène. Tous les types de formations rocheuses, qu'elles soient sédimentaires, plutoniques, volcaniques ou métamorphiques y sont représentés. Les anciens reliefs présentent des ensembles granitiques, gneissiques et schisteux d'âge hercynien ou même cadomien. Ce sont : la Corse, la bordure Est et Sud-Est du Massif central (du Morvan à la Montagne Noire), la partie orientale des Pyrénées et le socle provençal (massif des Maures et de l'Esterel). Les Alpes internes sont à la fois granitiques, schisteuses et sédimentaires. Le Jura et les Préalpes sont des reliefs récents dont les roches sont exclusivement sédimentaires (calcaires, marnes, dolomies...).

## **1.2. LA SECTORISATION DU BASSIN RHONE – MEDITERRANEE & CORSE EN FONCTION DU CONTEXTE GEOLOGIQUE**

### **1.2.1. Pourquoi cette sectorisation ?**

Les éléments traces retrouvés en solution dans les eaux souterraines et les eaux de surface ont une origine naturelle, anthropique ou mixte. Lorsque celle-ci est naturelle, la minéralisation finale d'une eau est fonction de la nature de la roche qui compose l'aquifère, du type de circulation au sein de la masse rocheuse, du temps de contact avec les minéraux, des phénomènes d'oxydoréduction et du renouvellement de l'eau dans le réservoir par les apports d'eau météorique. La composition chimique naturelle des eaux souterraines répond donc à un déterminisme en partie dû à la nature lithologique des aquifères et des terrains superficiels traversés par l'eau.

Le plus souvent les éléments traces sont associés à des minéraux qui composent les roches magmatiques plutoniques (granites par ex.) ou volcaniques (basaltes) et métamorphiques (gneiss, schistes). Il est plus rare de les trouver dans les roches sédimentaires, sauf dans celles issues directement de la destruction des massifs anciens granitiques, gneissiques... comme par exemple les grès permien du bassin de Lodève (34). De plus, il est possible de rencontrer certains éléments traces dans des filons recoupant les roches sédimentaires.

Sur le bassin RM & C, les roches les plus riches en éléments traces sont donc les roches issues du socle hercynien ou varisque ; dont la répartition spatiale est la suivante : la Corse, les Maures, les Alpes internes, le Sud des Vosges, les Pyrénées orientales, la Montagne Noire et la bordure Sud-Est et Est du Massif central.

En conséquence, le bassin RM & C est découpé en fonction des grands ensembles géologiques qu'ils soient de socle (milieux essentiellement cristallins) ou de couverture (milieux sédimentaires et volcaniques). Ce découpage est basé sur la recherche d'unités géographiquement et géologiquement « homogènes » à partir de la carte géologique au 1 / 1 000 000<sup>ème</sup>.

### **1.2.2. Quelles sont ces unités ?**

Afin de faciliter la recherche bibliographique par l'intermédiaire de mots clés, de permettre un meilleur tri des ouvrages sélectionnés et de réaliser une synthèse bibliographique par grand ensemble géologique, le bassin RM & C a été découpé en 18 secteurs. Cette subdivision, classée par ordre alphabétique, est la suivante (Figure 2) :

Secteur des « Alpes occidentales » : nous avons fait le choix de placer dans ce secteur les formations sédimentaires marines mésozoïques et cénozoïques plissés à fortement plissés des chaînes subalpines (Bornes, Bauges, Chartreuse et Vercors, Barronies, ventoux, Digne, Haut Verdon, ...) de la zone « externe » des Alpes dont les roches n'ont pas été affectées par le métamorphisme alpin.

- Secteur des « Alpes internes et massifs cristallins externes » : nous avons regroupé dans cet ensemble le domaine géologiquement très complexe, de la zone interne des Alpes qui se développe en forme de croissant le long de la frontière franco-italienne, en y adjoignant les massifs cristallins de la zone externe (Mont-Blanc, Aiguilles Rouges, Beaufortain, Belledonne, Pelvoux, Argentera, ...). Ce secteur regroupe donc des formations très variées.
- Secteur du « Bassin molassique lémanique » : il s'agit des dépôts détritiques tertiaires essentiellement gréseux, sédimentés dans le bassin subalpin (principalement au Miocène) qu'on retrouve entre le massif du Jura et l'arc alpin. Ce secteur s'étend de Chambéry (73) jusqu'au Pays de Gex (01) pour sa partie française ;

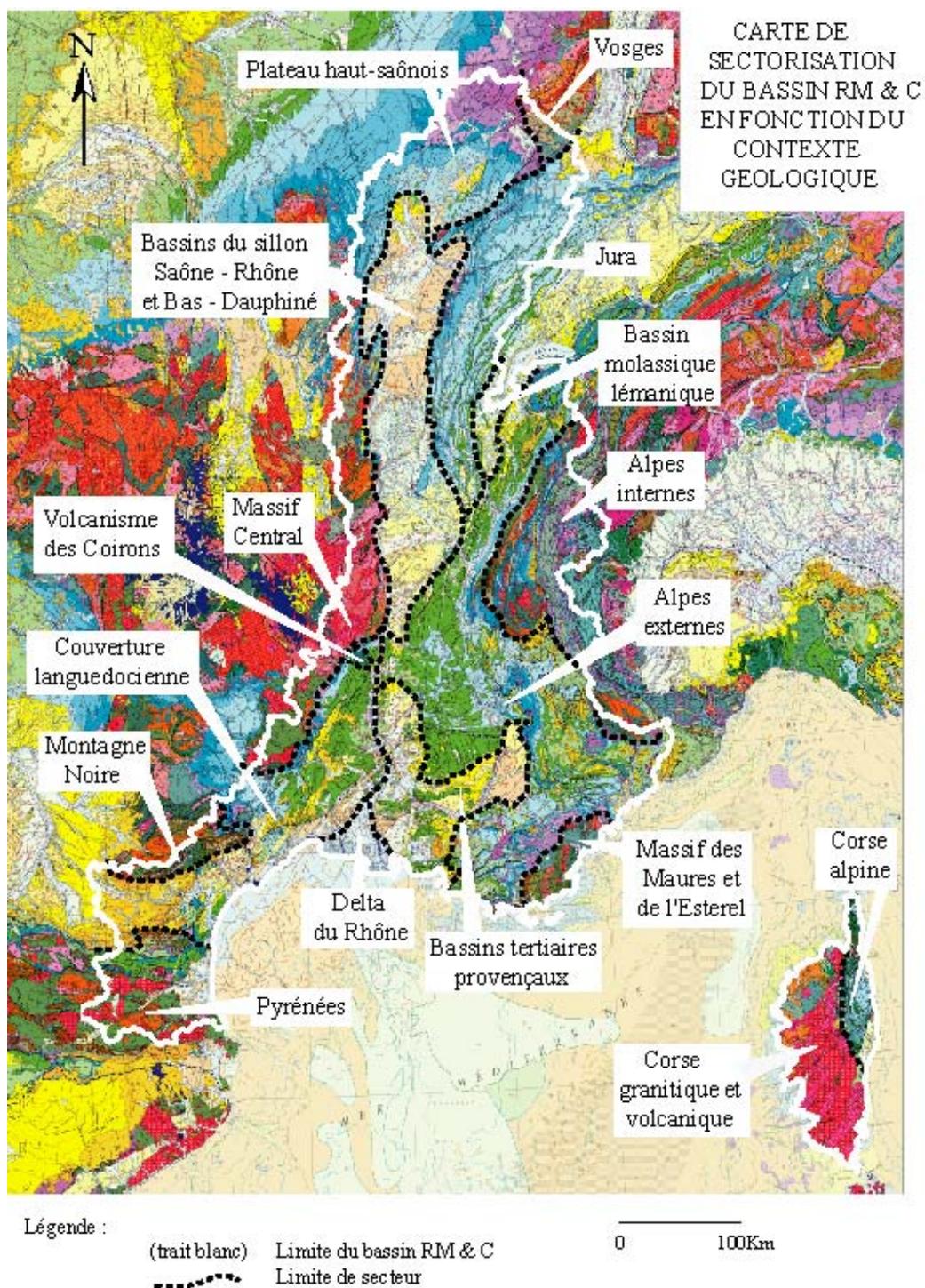


Figure 2 : Carte des principales unités géologiques du bassin RM & C.

- Secteur du « Bassin parisien et plateau haut-saônois » : il s'agit de l'extrémité du Sud-Est du bassin parisien et du Morvan sédimentaire avec le grand ensemble marno-calcaro-gypseux Trias-Lias et une partie des calcaires du Dogger ;
- Secteur du « Bassins tertiaires du Sillon Saône – Rhône et Bas Dauphiné » : cette vaste plaine, en forme de bande orientée Nord-Sud, est composée par les sédiments tertiaires oligo-miocènes. Géographiquement, elle correspond au Bas Dauphiné, à la région des Dombes et à la Bresse ;
- Secteurs des « Bassins tertiaires provençaux » : il s'agit des bassins sédimentaires tertiaires de Valréas, de Carpentras et d'Apt, d'une partie de la vallée de la Durance mais également de la molasse entre la Durance et Digne-les-Bains ;
- Secteur de la « Corse alpine » : il s'agit du secteur Nord-Est de la Corse dont les formations sont dominées par les schistes lustrés alpins et les ophiolites. Un bassin miocène est présent à l'Est ;
- Secteur de la « Corse granitique et volcanique » : il correspond au reste de l'île dont la majorité des roches est principalement granitique. Dans la partie Nord, il existe un domaine volcanique que l'on peut raccorder à celui du massif de l'Esterel ;
- Secteur de la « Couverture languedocienne » : il s'agit des terrains sédimentaires secondaires et tertiaires situés entre le socle du Massif Central, et la côte méditerranéenne recoupés par les vallées principales de l'Aude, de l'Hérault et du Gard ;
- Secteur du « Delta du Rhône » : ce secteur correspond aux dépôts récents du Rhône à hauteur de son delta. Cette grande plaine camarguaise constituée de dépôts alluvionnaires, limoneux et deltaïques est parsemée de nombreux étangs lorsqu'on se rapproche de la côte ;
- Secteur du « Jura » : il est constitué par la couverture sédimentaire mésozoïque tabulaire ou plissée tabulaire (alternance de marnes et de calcaires) allant du Sud du fossé Rhénan jusqu'au massif de la Chartreuse au nord de Grenoble ; les formations calcaires sont très largement karstifiées dans ce domaine.
- Secteur du « Massif Central » : c'est toute la bordure Est et Sud-Est du Massif Central, autrement dit du Morvan aux Cévennes ; avec comme formations principales des granites, des gneiss, des schistes ainsi que quelques épanchements volcaniques ;
- Secteur de la « Montagne Noire » : cette zone correspond à l'extrémité Sud du Massif. Elle est constituée de granites, gneiss et schistes, mais aussi de roches sédimentaires métamorphisées datant du primaire ;

- Secteur des « Pyrénées » : il est constitué des formations cristallines des Pyrénées orientales et du massif de l'Agly, et des dépôts primaires fortement plissés du massif du Mouthoumet. S'intercalent entre ces zones des domaines sédimentaires secondaires et tertiaires plissés ;
- Secteur des « Vallées du Rhône et de la Saône » : ce secteur alluvial quaternaire est celui qui longe toute la bordure Est du Massif Central de Chalon-sur-Saône (71) à Avignon (84) ;
- Secteur « Maures et Esterel » : il correspond au socle provençal hercynien avec dans sa partie Sud le massif des Maures (granites, gneiss, schistes...) et dans sa partie Nord le massif de l'Esterel (essentiellement volcanique) ;
- Secteur du « Volcanisme des Coirons » : ce massif est constitué des coulées basaltiques récentes de l'Ardèche constituant un réservoir hydrogéologiquement différent par rapport à son encaissant carbonaté ;
- Secteur des « Vosges » : il comprend les dépôts paléozoïques (Permien et Carbonifère), les formations volcano-sédimentaires du Viséen et du Tournaisien ainsi que le massif granitique hercynien des Ballons.

## **2. Le rassemblement des données et des informations disponibles**

La phase 1 de l'étude dont le présent rapport marque la fin a pour objectif de rassembler toutes les données et toutes les informations disponibles sur les éléments traces naturels dans les eaux du bassin Rhône – Méditerranée & Corse.

Ce travail s'est articulé en deux étapes : recherche des références bibliographiques d'une part, collecte des données brutes disponibles d'autre part.

Le chapitre suivant présente le travail accompli pour la réalisation de ces deux étapes.

### **2.1. LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

Une recherche bibliographique exhaustive a permis de recueillir des références sur la présence des éléments traces dans les eaux souterraines et les cours d'eau du bassin. Bien que l'étude ne concerne que le bassin Rhône – Méditerranée & Corse, cette recherche a parfois porté sur des zones en dehors du bassin mais dont le contexte géologique s'est avéré pertinent pour la présente étude (possibilité de transposer les résultats à des zones de contexte équivalent dans le bassin).

#### **2.1.1. L'utilité de la recherche bibliographique**

Le but de cette recherche bibliographique est d'identifier la nature des concentrations observées en éléments traces dans les eaux souterraines et les eaux de surface. L'origine de teneurs anormalement élevées est soit naturelle et est donc liée à la géologie, soit anthropique. Ainsi il est possible de formuler dans un premier temps une interprétation des données brutes et ensuite d'établir pour chaque masse d'eau une estimation du fond géochimique naturel.

L'autre objectif de cette recherche est d'identifier la présence potentielle d'éléments traces dans les sols et de les corrélés à un contexte géologique particulier. En reprenant les caractéristiques physico-chimiques de chacun des éléments ainsi que les conditions du milieu (pH, Eh...) il est possible d'émettre des hypothèses sur leur présence dans les eaux de surface et souterraines.

De plus, en combinant la géologie et la chimie des eaux, la transposition de certaines occurrences en traces sur d'autres secteurs, dont les données sur les eaux sont manquantes, est réalisable.

Enfin, cette recherche offre la possibilité de collecter des informations sur des secteurs mal couverts par les bases de données.

## 2.1.2. La stratégie employée pour cette recherche

### **Liste de bases de données consultées**

Les sites Internet de certains organismes publics peuvent renfermer une liste détaillée d'ouvrages, de revues, de thèses, de publications scientifiques, ou de données brutes dont il est possible de consulter les références bibliographiques ou bien même, dans certains cas, de les consulter directement. Cette liste constitue une base de données. Les principales bases de données et types de documents interrogés sont :

- Base CSA (Cambridge Scientific Abstracts) :

Elle commercialise une cinquantaine de bases de données thématiques produites par CSA ou des éditeurs associés dans plusieurs disciplines. Ont été choisis :

- Géoref, une des seules bases spécialisée en Sciences de la Terre, réalisée par l'AGI (American Geologic Institute) ;
- Environmental Sciences and Pollution Abstracts (depuis 1981), produit par CSA et concerne en particulier les domaines environnementaux ;
- Aqualine, depuis 1960, plus spécialisé dans le domaine de l'eau.
- Base SCIENCE DIRECT : 1900 revues et publications scientifiques depuis 1995.
- Base des rapports du BRGM. L'interrogation a porté sur la totalité des rapports disponibles au BRGM c'est-à-dire quelque soit leur communicabilité (accès réservé, public ou confidentiel). Pour information, l'ensemble des références dont l'accès est public sont disponibles sur Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>).
- Cartes géologiques au 1/50 000 et au 1/80 000 appartenant au bassin Rhône – Méditerranée & Corse avec notamment les notices géologiques qui décrivent les formations rocheuses susceptibles de renfermer des éléments traces.

### **Recherche bibliographique directe et indirecte**

La recherche de documents utilisables et exploitables pour une étude donnée peut se faire selon différents procédés.

La première méthode est d'effectuer **une recherche directe** en demandant à la base de données de réaliser un tri de documents par un ou plusieurs critères sélectifs qui sont :

- le type : ouvrage, revue, journal, publication, thèse, livre... ;
- l'auteur ;
- la date de publication ;

- le contexte géographique ;
- le thème ;
- etc...

La deuxième méthode consiste en **une approche indirecte** par l'intermédiaire de mots clés. Ces derniers doivent être compris dans le titre de l'article ou de la revue par exemple, ou encore dans le résumé s'il existe. Ils sont employés avec le système des « ET » (AND) et « OU » (OR) qui correspond à un jeu de conditions imposées par l'opérateur.

Les mots clés, français et/ou anglais, les plus utilisés dans la recherche bibliographique ont été choisis de façon à limiter **en nombre** les ouvrages référencés. Pour cela, il a été nécessaire de faire une sélection des mots clés par **éléments chimiques** (cadmium, plomb, argent...) ET/OU par **secteurs géographiques** préalablement déterminés et en relation avec les zones de socle.

### **2.1.3. Liste des mots clés les plus employés**

#### ***Les mots clés en rapport avec la géographie***

Agly, Alpes, Ardèche, Aude, Ballons, Belledonne, Bresse, Camargue, Cévennes, Corse, Côte d'Azur, Dauphiné, Doubs, Durance, Ecrin, Europe, France, Hérault, Isère, Jura, Languedoc-Roussillon, Lozère, Massif Central, Maures, Mont-Blanc, Montagne Noire, Morvan, Mouthoumet, Pelvoux, Provence, Pyrénées Orientale, Rhône, Saône, Savoie, Var, Vercors, Vosges ... mais également Europe, France...

#### ***Les mots clés en français***

Eau, eau souterraine, eau de surface, cours d'eau, métaux, métaux lourds, élément trace, fond géochimique, pollution, concentration, minéralisation, contamination, mine, gisement, minerai, filon, gîte, aluminium, antimoine, argent, arsenic, baryum, cadmium, chrome, cuivre, fer, fluor, manganèse, mercure, nickel, plomb, sélénium, zinc...

#### ***Les mots clés en anglais***

Water, groundwater, surface water, metals, heavy metals, trace element, geochemical baseline, pollution, concentration, mineralisation, contamination, deposit, ore, dyke, aluminium, antimony, arsenic, barium, cadmium, chromium, copper, fluorine, iron, lead, manganese, mercury, nickel, selenium, silver, zinc...

## **2.2. LES DONNEES BRUTES**

### **2.2.1. Les eaux souterraines**

L'essentiel des données brutes sur la chimie des eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée & Corse a été extrait de la banque ADES ([www.ades.eaufrance.fr](http://www.ades.eaufrance.fr)). L'extraction a été réalisée début juin 2005.

Les données ainsi collectées sont issues de différents types de réseaux et de différents producteurs que l'on peut regrouper ainsi :

- Réseau de connaissance générale de l'AERM&C : afin d'évaluer l'état général des eaux souterraines du bassin, l'Agence de l'Eau dispose d'un réseau de 266 points. Conformément au protocole national de 1999 du RNES (Réseau National de connaissance des Eaux Souterraines) auquel il se réfère, le réseau de l'AERM&C ne fournit des données sur les éléments traces sur la totalité des points du bassin que tous les cinq ans. La dernière campagne d'analyses date ainsi de 2001. Sur certains sites, des analyses ont toutefois été réalisées au cours des autres années.
- Réseau du contrôle sanitaire : les analyses chimiques produites par les DDASS dans le cadre du contrôle sanitaire et enregistrées dans ADES ont été collectées. A la date d'extraction, ces données couvraient la période 1995 – 2002. Afin de compléter les données disponibles, une collecte auprès de chaque DDASS a été entreprise. Il s'agit ainsi de récupérer toutes les données sur les éléments traces non enregistrées dans la banque ADES. En effet, seules les données du contrôle sanitaire de routine alimentent la banque nationale. Les autres données ainsi collectées sont par exemple des prélèvements réalisés pour des études spécifiques ou encore des analyses réalisées lorsqu'un dépassement du seuil de potabilité est observé pour un paramètre et que les contrôles s'intensifient.
- Autres réseaux : il s'agit de toutes les autres données acquises par différents producteurs (Conseils Généraux, Syndicats, ...) et à des échelles très variées (région, département, nappe). Ces réseaux sont le plus souvent des réseaux de connaissance générale.

### **2.2.2. Les eaux de surface**

Les données sur la physico-chimie des eaux de surface ont été transmises par l'AERM&C. Il s'agit des données acquises dans le cadre du Réseau National de Bassin (RNB) et de son réseau complémentaire de bassin.

Les données collectées sont à la fois les mesures en éléments traces sur les différents supports intéressants les eaux de surface (eau, matières en suspension, bryophytes, sédiments) mais également des données de physico-chimie classique. Le tableau suivant présente les paramètres pour lesquels des données sont disponibles dans les eaux de surface du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Il convient de noter que les prélèvements pour l'analyse des éléments traces ont été réalisés à des dates différentes des prélèvements pour l'analyse des autres paramètres. Lors de la phase 2 de l'étude, il sera donc important de manipuler ces données avec précautions.

Les paramètres physico-chimiques classiques sont analysés 6 à 12 fois par an tandis que les métaux ne sont mesurés qu'une fois par an sur sédiments et bryophytes. Au total, ce sont 200 stations qui sont concernées par des analyses en éléments métalliques. Sur seulement 15 d'entre elles, les analyses portent sur la phase dissoute et les matières en suspension.

<b>Eléments traces</b>	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn
<b>Physico-chimie in situ</b>	pH, Température, O <sub>2</sub> dissous, O <sub>2</sub> dissous (saturation), Conductivité, Débit (non systématique)
<b>Autres paramètres</b>	COD, Cl, MES, Na, DBO <sub>5</sub> , Ca, Oxydabilité KMnO <sub>4</sub> , Mg, Azote Kjeldahl, SO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> , K, NO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> , TAC, PO <sub>4</sub> , Dureté, P total

Tableau 1 : Paramètres disponibles dans la base de données sur les eaux de surface de l'AERM&C.

### 2.2.3. Le sol

Les teneurs en éléments traces dans le sol peuvent donner des renseignements précieux pour l'identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les eaux continentales. La présence d'un élément dans le sol ne sera toutefois pas considérée comme une preuve directe de la présence de cet élément dans les eaux souterraines ou les eaux de surface. Il conviendra en effet de tenir compte de différents facteurs dont la solubilité et le transfert vers chaque compartiment.

Les principales données sur les sols sont issues des bases gérées par l'INRA et l'ADEME et valorisées dans le cadre du GIS-Sol. Deux de ces bases se sont avérées potentiellement intéressantes pour l'étude :

- la **Base de Données des Analyses de Terre (BDAT)** : il s'agit d'analyses de terre réalisées à la demande d'agriculteurs pour gérer au mieux la fertilisation. Environ 250 000 analyses sont ainsi disponibles sur tout le territoire métropolitain (Figure 3). Malheureusement, le bassin Rhône – Méditerranée & Corse n'est pas le mieux couvert. Les régions du bassin dans lesquelles les données sont les plus abondantes sont le Jura et la vallée de la Saône. L'avantage de cette base de données est d'offrir une grande quantité de résultats. Cependant, du fait d'une importante diversité des origines, les méthodes analytiques employées sont très différentes d'un site à l'autre ce qui n'est pas sans conséquence sur la qualité des résultats (seuils de détection souvent importants, intercomparaison difficile). En outre, dans le cadre d'une étude sur les fonds géochimiques naturels, le problème de la représentativité de ces informations se pose. Les données ont en effet été acquises en milieu agricole donc sous influence anthropique. Il conviendra alors d'utiliser ces résultats avec la plus grande prudence. Dans certains cas, ils pourront cependant servir à identifier la nature anthropique de certaines occurrences.

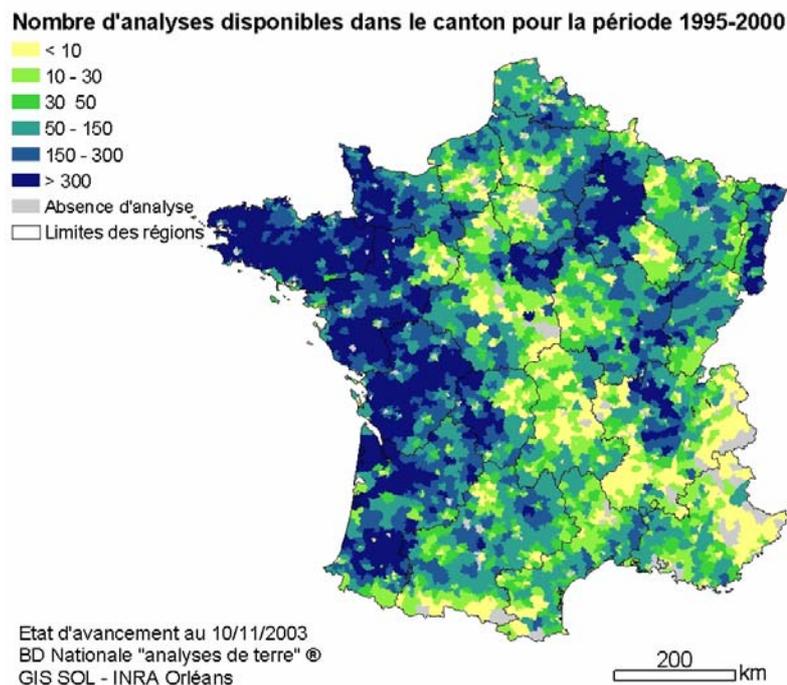


Figure 3 : Etat d'avancement de la BDAT. Source : GIS-Sol - INRA, 2005.

- la **base de données des analyses de l'ADEME (ANADEME)** : cette base intègre la base de données sur les éléments traces métalliques (BDETM). Il s'agit d'analyses en éléments traces métalliques réalisées dans les sols sur tout le territoire national entre 1988 et 1998 dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues d'épuration. Sur les 11 000 échantillons disponibles dans cette base, plus de 8 000 sont correctement géoréférencés avec des mesures en chrome, cadmium, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium et zinc. Selon l'INRA, cette base permet de fournir une image générale des concentrations actuelles en éléments traces métalliques dans les sols agricoles français. Les principaux inconvénients de cette base sont liés au fait que les analyses ne portent que sur les horizons de surface des sols cultivés et que, bien que les prélèvements aient été réalisés avant les épandages, les résultats traduisent à la fois le fond pédogéochimique naturel mais également la somme des apports anthropiques précédant ces épandages. Là encore, les données issues de cette base devront être exploitées avec précaution.

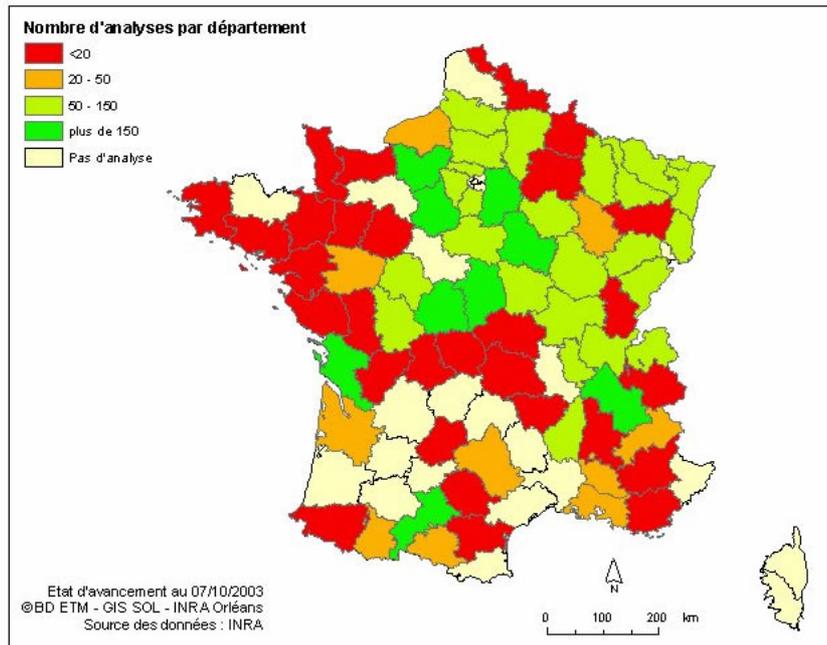


Figure 4 : Etat d'avancement de la BDETM. Source : GIS-Sol – INRA.

Pour plus de détails sur les bases de données du sol, il est recommandé de consulter le site Internet du GIS-Sol (<http://gissol.orleans.inra.fr>).

Compte tenu de ces éléments, les bases de données sur les sols pourront être utilisées lors de la phase 2 pour l'identification des zones à risque de fond géochimique naturel élevé. Elles devront cependant être utilisées avec précaution. Leur représentativité est en effet discutable à plusieurs niveaux : au niveau analytique d'une part (méthodes trop différentes d'un site à l'autre), et au niveau du contexte qu'elles reflètent d'autre part. Ces échantillons, prélevés en milieu agricole, intègrent en effet des apports anthropiques. Ces données pourront à l'inverse servir à identifier l'origine d'un élément dans les eaux souterraines ou dans les eaux de surface du bassin. Par exemple, si du cuivre a été mesuré dans des concentrations significatives dans une nappe et que dans la zone d'alimentation de cette même nappe les données sur les sols mettent en évidence des anomalies en cuivre d'origine agricole, alors il sera possible d'affirmer que la présence de cuivre dans les eaux souterraines n'est pas naturelle.

Ces couches d'informations permettront ainsi d'affiner les zones à risque de fond géochimique élevé dans les eaux en permettant de distinguer les apports anthropiques des sources naturelles en éléments traces.

#### 2.2.4. L'inventaire géochimique national

Depuis le milieu des années 90, le BRGM a été mandaté pour valoriser les données de l'inventaire géochimique national (Barbier et Chery, 1995 ; Chery et Gateau, 1998). Le

principal objectif de ce travail était d'identifier les zones à risque de teneurs naturelles élevées en éléments traces dans les eaux destinées à l'alimentation en eau potable. Deux types d'informations sont ainsi disponibles et seront exploitées pour la suite de l'étude :

- les données brutes de l'inventaire (sous forme de fichier Excel par département). Les départements du bassin pour lesquels des données sont disponibles sont représentés sur la carte suivante. On remarquera que les zones les plus couvertes sont les zones de socle. On dispose ainsi d'analyses géoréférencées sur les teneurs de 23 éléments traces dans des sols et sur des fines d'alluvions  
Tableau 2.

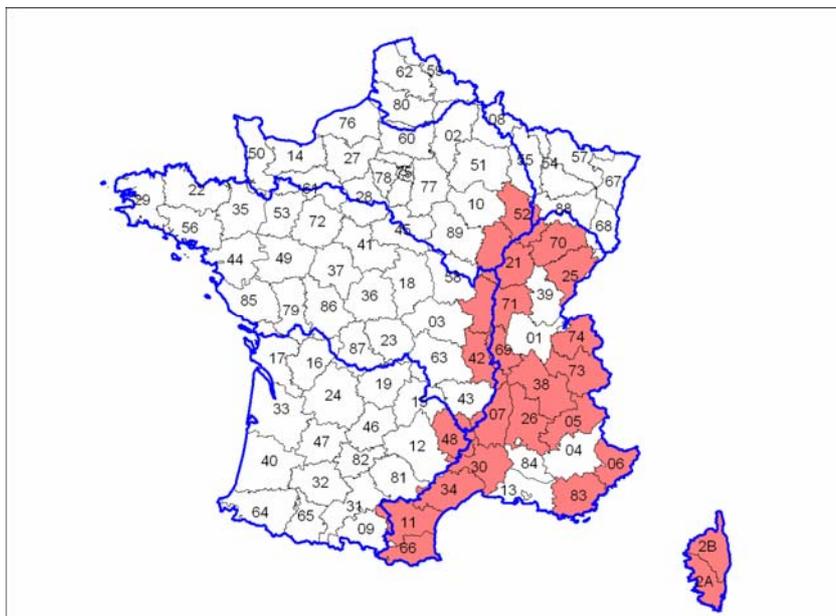


Figure 5 : Départements du bassin RM&C pour lesquels des données de l'inventaire géochimique national sont disponibles.

- une cartographie des teneurs dans les sols pour les paramètres **arsenic**, **antimoine** et **baryum** dans les départements où les données sont les plus nombreuses.

L'intérêt de cette base de données réside principalement sur sa couverture et sur le nombre limité de méthodes analytiques utilisées. Seulement deux méthodes d'analyses ont été utilisées au cours de ces mesures : la spectrométrie à plasma diffusif (DCP) de 1976 à 1981, et la spectrométrie à plasma inductif (ICP) à partir de 1981. La variabilité des données est donc plus limitée que pour les données sur les sols décrites précédemment. Comme le soulignent Chery et Gateau (1998), il conviendra cependant de rester prudent lors de la comparaison des données entre elles. D'après ces auteurs, les fonds géochimiques que l'on peut calculer à partir de l'une ou de l'autre des techniques analytiques peuvent en effet présenter des écarts sensibles. C'est pour cette raison que les résultats produits par chacune des méthodes d'analyse sont mis à disposition dans deux fichiers distincts. Il sera ainsi possible, au

cours de la phase 2 de l'étude, de réaliser les traitements cartographiques en tenant compte de ce biais.

TECHNIQUES ANALYTIQUES MULTIELÉMENTAIRES						
Eléments	DCP		ICP		quantomètre	
	Seuil inf.	Seuil sup.	Seuil inf.	Seuil sup.	Seuil inf.	Seuil sup.
Ag	0.2	100		300		40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)			1	100	3	50
As	10	1 000	20	50 000	20	1 300
B	10	1 000	10	18 000	10	1 800
Ba	10	1 000	10	3 500	5	5 000
Be	1	100				
Bi			10	10 000		
CaO (%)					3	100
Cd	1	250	2	5 000	4	250
Co	1	1 000	5	25 000	10	4 000
Cr	10	1 000	10	13 000	10	3 000
Cu	10	1 000	5	8 000	3	1 000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,1	23	1	100	1	100
K <sub>2</sub> O (%)					1	16
La					200	5 000
MgO (%)			1	50	1	50
MnO (%)	0,01			20		1
Mo	2	250	5	7 500	3	5 000
Na <sub>2</sub> O					1	16
Nb	10	1 000	20	15 000	200	10 000
Ni	10	1 000	10	18 000	5	4 000
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	10			8		2
Pb	10	1 000	10	6000	15	3 000
Sb	20	1 000	10	25 000	50	2 000
SiO <sub>2</sub>			1	100	3	100
Sn	20	1 000	10	20 000	20	3 000
V	10	1000	10	4 000	5	5 000
W	10	1 000	10	15 000	50	2 000
Y	5	200	20	15 000	75	15 000
Zn	10	1 000	5	20 000	5	600
Zr			20	13 000	50	15 000

Tableau 2 : Eléments analysés dans le cadre de l'inventaire géochimique national et seuils de détection analytique, en spectrométrie à plasma DCP et ICP, et au quantomètre. Les valeurs sont en ppm (mg/kg ou µg/g), sauf quand il est spécifié qu'elles sont en %).

### 2.2.5. Les gîtes miniers

Toutes les minéralisations qui ont fait l'objet d'une exploitation, petite ou grande, sont enregistrées dans la Base du Sous-Sol (BSS). Au total, 1 700 gisements sont ainsi renseignés sur toute la France.

Cette base de données permettra d'identifier la présence d'éléments traces dans les roches et selon la capacité de chacune de ces substances à passer en solution, il sera possible de prévoir leur présence potentielle dans les eaux de chaque secteur.

## 2.2.6. Les données de l'atlas géochimique européen FOREGS

### **Présentation du projet**

L'idée de réaliser un atlas géochimique européen est née en 1985. Cependant, une enquête réalisée auprès des différents services géologiques européens a montré que de larges portions de la surface européenne n'étaient pas couvertes en géochimie et qu'il était pratiquement impossible de corréliser entre elles les diverses bases existantes tant elles divergeaient à la fois par les milieux étudiés, les méthodes d'échantillonnage, les techniques de mise en solutions ou de dosages. Le projet n'a alors pas connu de suite.

Il faut attendre 1997 pour que la décision de faire un prélèvement multi-milieux (sols à deux profondeurs, eaux de surface, sédiments actifs, limons d'inondations) pour couvrir les pays de l'Union Européenne soit prise. En France, c'est le BRGM qui devient opérateur du projet. Les prélèvements sont réalisés en 1998 et 1999. Les premiers résultats de ces travaux ont été présentés à Florence en 2004 lors d'un congrès. L'Atlas est depuis août 2005 publié officiellement (Salminen *et al.*, 2005).

### **Présentation des données et de l'échantillonnage**

Du point de vue de l'échantillonnage, l'Europe a été divisée en mailles de 160x160 km soit 22 cellules pour la France. Pour chaque cellule 5 sites ont été tirés au hasard pour réaliser les prélèvements avec au moins 1 site amont (bassin <100 km<sup>2</sup>) où ont été prélevés un échantillon d'eau de rivière, un échantillon de sédiments actifs, un échantillon de sol supérieur et un de sol inférieur, et plus rarement un humus. Un site en aval complète ce programme (bassin de 1 000 à 6 000 km<sup>2</sup>) avec un prélèvement de limon supérieur et un prélèvement de limon inférieur.

### **Utilisation des données de l'atlas**

Les données de l'atlas géochimique européen permettent d'aborder les grandes fluctuations du fond géochimique à l'échelle continentale, notamment pour des éléments très rarement dosés. Ses applications en épidémiologie et en appui aux instances européennes pour l'établissement de nouvelles normes de protection environnementale sont certaines. La géochimie des limons est intégratrice de larges bassins versants et davantage représentative par rapport à la géochimie des sédiments actifs davantage perturbée par la dynamique alluviale. Pour les études d'impact, elle permet également de revenir à l'état zéro (pré-industriel), en analysant les séquences inférieures. Par contre, compte tenu de la faible densité d'échantillonnage adoptée (pour des raisons budgétaires évidentes), **l'application de cette base aux échelles locales pour l'évaluation du fond géochimique par exemple, est délicate**. Dans la suite de l'étude, on restera donc prudent quant à l'utilisation de ces résultats qui doivent être considérés à une échelle globale comme celle des cartes suivantes.

Ces données représentent cependant des avantages certains que peu d'autres bases offrent :

- les méthodes analytiques ont été standardisées et permettent ainsi une intercomparaison des données.
- Certains éléments rarement mesurés ont été analysés (sélénium et uranium notamment).
- Des mesures dans les limons sont disponibles ce qui est nouveau.

Les cartes suivantes (Figure 7 à Figure 9) présentent quelques exemples de valorisation de l'atlas géochimique européen.

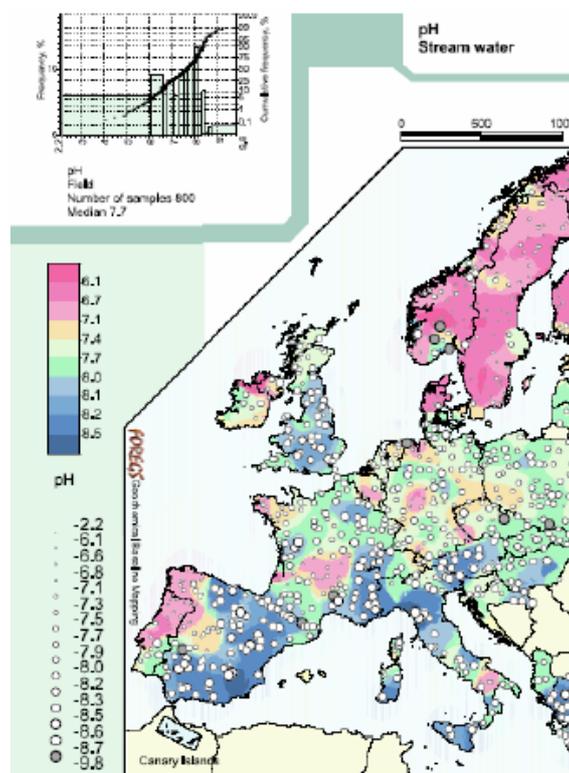


Figure 6 : pH des eaux de surface d'Europe. Source : FOREGS.

Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans le bassin RM & C

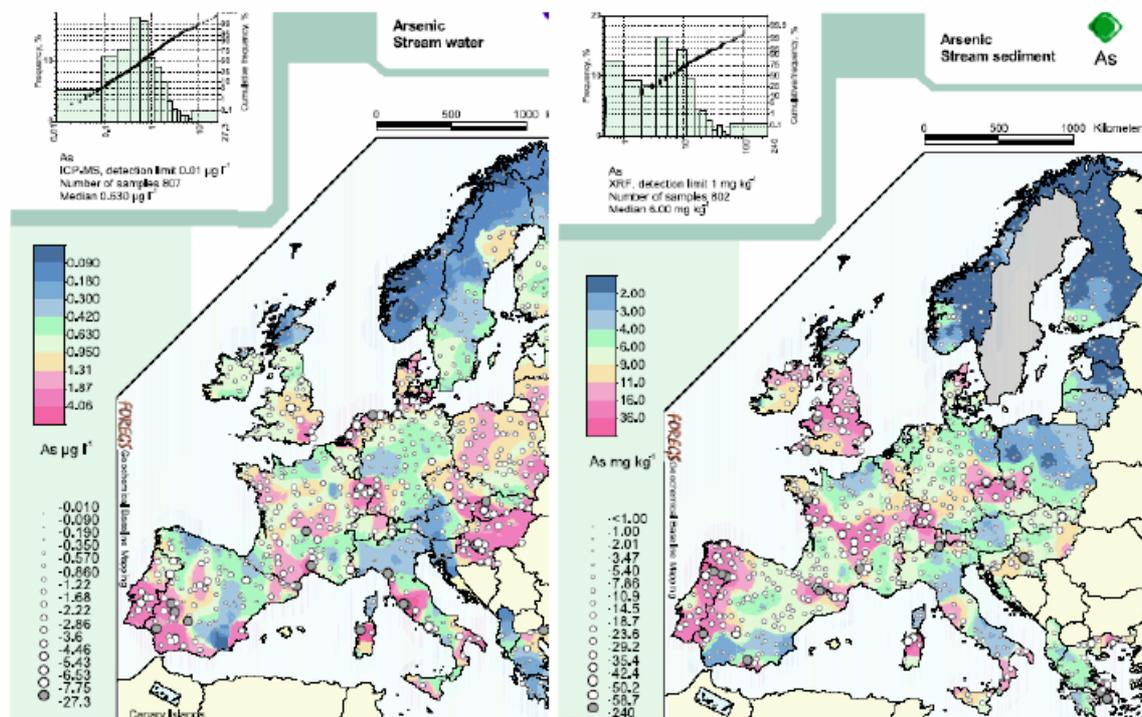


Figure 7 : Teneurs en arsenic dans les eaux de surface (à gauche) et dans les sédiments d'Europe (à droite). Source : FOREGS.

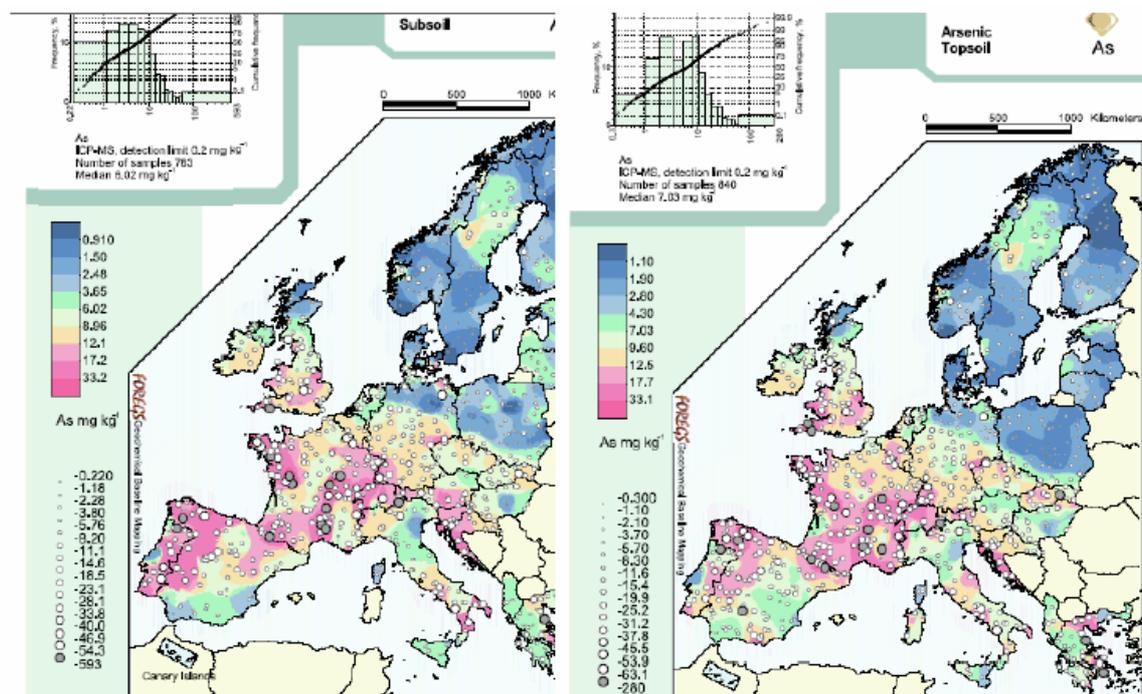


Figure 8 : Teneurs en arsenic dans les sols supérieurs (à gauche) et dans les sols inférieurs d'Europe (à droite). Source : FOREGS.

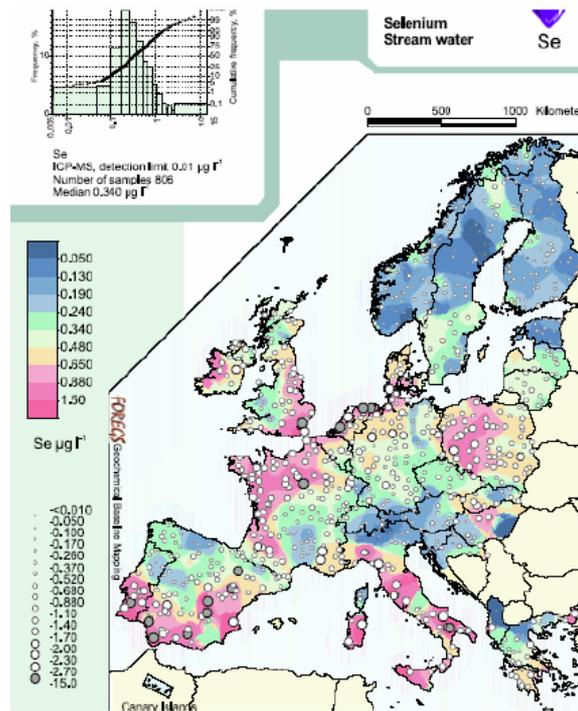


Figure 9 : Teneurs en sélénium dans les eaux de surface d'Europe. Source : FOREGS.

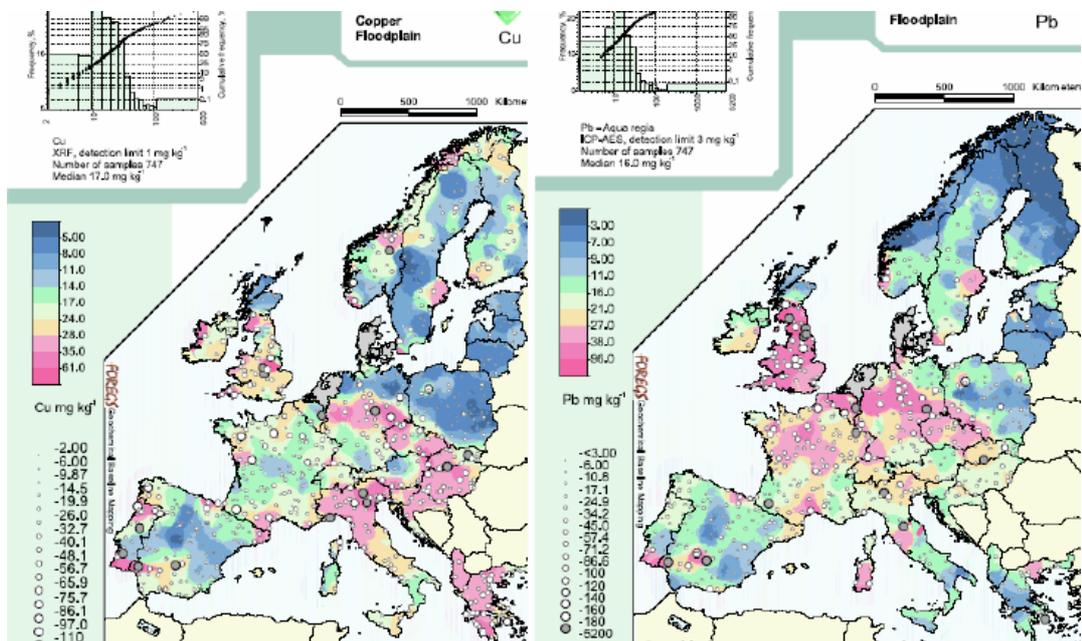


Figure 10 : Teneurs en cuivre et en plomb dans les limons supérieurs d'Europe. Source : FOREGS.

### **3. Les résultats de la recherche bibliographique – Bilan des occurrences par secteur**

L'ensemble des références bibliographiques collectées a été exploité de manière à identifier pour chacun des secteurs du bassin, les éléments traces présents à l'état naturel dans les cours d'eau et/ou les eaux souterraines.

Pour les eaux souterraines, outre les informations issues de cette recherche bibliographique, il est possible de s'appuyer sur les résultats de l'étude nationale (BRGM, 2005) qui fournit pour chacun des éléments traces les conditions favorables à sa présence et l'ordre de grandeur des concentrations généralement rencontrées à l'état naturel. Le tableau suivant reporte pour chacune des substances abordées dans l'étude les informations les plus importantes pour prévoir leur occurrence dans les eaux souterraines. Ces clés de lecture permettront également, lorsque les données disponibles ne concernent que les roches et non les eaux, d'estimer la possibilité de mise en solution de chaque élément.

Dans une certaine mesure, ces informations pourront également être utilisées pour les eaux de surface. En effet, en tête de bassin versant la géochimie des cours d'eau est directement liée au contexte géologique du bassin versant.

Pour chaque secteur, on trouvera dans ce chapitre un rappel du contexte géologique ainsi qu'une revue des occurrences en éléments traces dans les roches, dans les sols et dans les eaux.

Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans le bassin RM & C

		Norme (Décret 1220 du 20/12)	Fond géochimique dans les eaux souterraines
Toxiques	Antimoine	5 µg/l	Les teneurs en antimoine supérieures au seuil analytique de 1 µg/l sont rares, elles ont lieu dans les zones très localisées dont le fond géochimique naturel est riche en antimoine.
	Arsenic	10 µg/l	Des concentrations dans les eaux souterraines de quelques µg/l à quelques dizaines de µg/l en arsenic sont assez fréquentes. Les variations des conditions d'oxydo-réduction du milieu influencent les teneurs en arsenic.
	Cadmium	5 µg/l	Il n'existe que très peu de concentration significative en cadmium d'origine naturelle. Elles sont si basses que leur mesure nécessite l'utilisation de méthodes analytiques fines de type ICP-MS.
	Chrome	50 µg/l	Les teneurs en chrome sont généralement inférieures à 1 ou 2 µg/l. Des plus fortes concentrations en chrome ne sont possibles que dans les eaux très oxygénées, mais ne dépassent jamais la norme.
	Mercurure	1 µg/l	La concentration en mercure dans les eaux souterraines ne dépasse généralement pas 1 µg/l. Les valeurs se situent le plus souvent autour de 0,1 µg/l. Peu de roches contiennent du mercure.
	Nickel	20 µg/l	Les concentrations en nickel sont généralement inférieures à quelques µg/l, même pour des eaux issues de milieux potentiellement riches en nickel. Des concentrations de quelques centaines de µg/l sont tout de même possibles dans le cas de l'oxydation de la pyrite.
	Plomb	10 µg/l	Des concentrations en plomb d'origine naturelle supérieures au seuil analytique sont très rares même si le contexte géologique est très riche (faible solubilité des complexes qu'il forme avec d'autres éléments).
	Sélénium	10 µg/l	Le sélénium est rare dans les eaux naturelles. Les plus fortes concentrations connues sont de l'ordre de 60 µg/l.
Indésirables	Aluminium	200 µg/l	Il n'est pas rare de rencontrer dans les eaux naturelles quelques µg/l, voire quelques dizaines de µg/l d'aluminium. Il arrive même que le seuil soit dépassé lorsque le pH du milieu est très acide.
	Argent	10 µg/l (décret français 89-3)	Les caractéristiques chimiques de l'argent n'autorisent pas l'existence, dans les eaux naturelles, de concentrations significatives (>1 µg/l). La solubilité de l'argent est limitée, mais des teneurs supérieures à 10 µg/l seraient tout de même possibles dans des conditions oxydantes.
	Baryum	700 µg/l	Elles dépassent couramment 100 µg/l dans les eaux souterraines. La présence de barytine est un élément favorable à ces occurrences à condition que la concentration en sulfates n'excède pas 10 mg/l. En effet, en présence d'ions sulfates, le baryum précipite en barytine.
	Cuivre	2 mg/l	Les caractéristiques chimiques de l'argent n'autorisent généralement pas l'existence de concentrations significatives dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent pas 1 µg/l, même si des teneurs plus forte sont possibles à un pH plus acide et s'il y a oxydation de sulfures de cuivre.
	Fer	200 µg/l	La concentration en fer dans les eaux souterraines est principalement contrôlée par le pH et le Eh du milieu, ainsi que par la matière organique. De très fortes teneurs existent et atteignent plusieurs mg/l lorsque les conditions sont optimales pour la mise en solution du fer.
	Manganèse	50 µg/l	Comme pour le fer, les teneurs en manganèse sont essentiellement contrôlées par les conditions de pH et de Eh. Il est possible de rencontrer dans les eaux plus de 1 mg/l de manganèse en milieu réducteur.
	Fluor	1,5 mg/l	Des concentrations de quelques mg/l de fluor ne sont pas rares dans les eaux souterraines du fait de sa forte solubilité. Des facteurs comme le pH ou encore la température sont importants pour la mise en solution du fluor.
	Zinc	5 mg/l	Aucune eau naturelle ne dépasse la norme de qualité. Les plus fortes concentrations connues sont de quelques centaines de µg/l. Mais il existe, pour des concentrations inférieures à 1 mg/l, un lien entre la géologie et du milieu et la concentration en zinc des eaux souterraines.

Tableau 3 : Relation entre éléments traces dans les eaux souterraines et fond géochimique (d'après Blum et al., 2002).

### **3.1. LES ALPES EXTERNES SEDIMENTAIRES**

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Pour des raisons pratiques de description et en raison de caractéristiques communes nous avons regroupé dans cet ensemble les formations sédimentaire de la zone externe des Alpes (Figure 11) et du domaine provençal.

Les formations sont d'âge secondaire et tertiaire, constituées en très grande majorité de calcaires et de marnes, mais également de formations détritiques comme les grès du Champsaur. La couverture sédimentaire est déformée en plis plus ou moins déversés du cœur du massif vers l'extérieur avec parfois des chevauchements, pouvant devenir importants dans le domaine oriental.

Dans les massifs subalpins les calcaires forment les réservoirs principaux et structurent les reliefs : calcaires urgoniens du crétacé supérieur (Barrémien-Aptien) qui forment une barre caractéristique dans le paysage de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et qu'on retrouve dans bon nombre de massifs (Bornes, Bauges, Chartreuse, Vercors, Ventoux, Lubéron) mais aussi calcaires tithoniques d'âge jurassique terminal qui sont présents dans tous les chaînons subalpins sans exception ou encore calcaires sénoniens pour le Dévoluy.

A l'Est, les premiers terrains qu'on retrouve à proximité des formations primaire de socle sont ceux du Trias (grès et gypses). A l'Ouest, les chaînons des Préalpes sont aux contact des bassins molassiques tertiaires du sillon péri-alpin (Bassin lémanique, Bas-Dauphiné, Valréas et Carpentras, Apt ...).

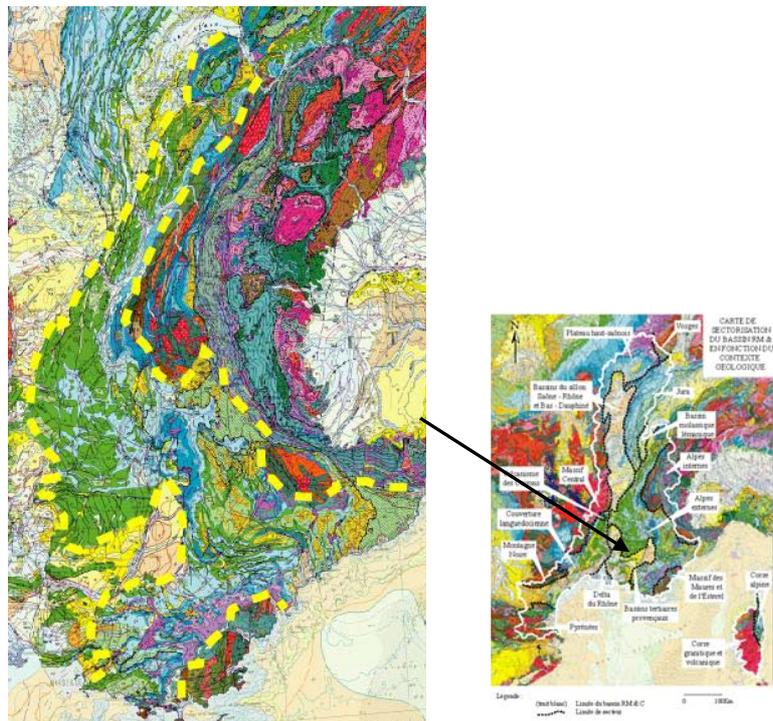


Figure 11 : Carte géologique des Alpes externes sédimentaire (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

## **Les principales occurrences en éléments traces**

### **• Dans les formations des Préalpes**

#### **Le Trias**

Le Trias préalpin est, d'une manière générale, le premier niveau géologique recouvrant le socle hercynien. Il est composé de terrains sédimentaires variés (calcaires, marnes, gypses, spilites...) avec une prédominance de niveaux salifères. Cet ensemble triasique est connu pour ses minéralisations métallifères exploitées (filoniennes et stratiformes) mais aussi pour sa médiocre qualité des eaux, souvent liée aux sulfates. En effet, il existe des problèmes de teneurs en sels et en métaux anormalement élevées aussi bien dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines (Gidon *et al.*, 1969 ; Gidon *et al.*, 1991 ; Antoine *et al.*, 1983 ; Pairis *et al.*, 1993 ; Mennessier *et al.*, 1976).

Les spilites du Trias renferment des filons stratiformes de sulfures de **cuivre** et de **zinc** (Kerckhove *et al.*, 1983) pouvant donner localement un fond géochimique non négligeable pour le **zinc** si les sulfures sont dissous.

Au niveau de Megève, la minéralisation des eaux se fait principalement au contact socle – couverture dans les grès permo-triasiques (Gidon *et al.*, 1969). Ce phénomène semble se généraliser à l'ensemble du massif alpin. Les eaux les plus minéralisées et les plus susceptibles d'être riches en éléments traces sont celles qui drainent le contact socle – couverture à la base du Trias.

#### **Le Lias**

Le Lias est aussi affecté par des filons de sulfures, mais à la différence du Trias, celui-ci est beaucoup plus pauvre en gisements métallifères. En conséquence, le risque d'observer un fond géochimique élevé en élément trace dans les eaux est plus faible. Néanmoins, il est possible de retrouver localement des métaux comme le **plomb**, le **fer**, le **zinc**, dans les roches de certains niveaux du Lias inférieur comme par exemple le Sinémurien. Les eaux qui drainent ces formations sont alors susceptibles d'être riches en **fer** et en **zinc**.

Par exemple, dans la zone de La Mure, à La Salle-en-Beaumont, de nombreux filons de calcites riches en sulfures de **nickel**, d'**arsenic** et de **zinc**, et très solubles, se retrouvent en inclusions dans les formations du Lias inférieur (Barfety *et al.*, 1989). Les teneurs en éléments métalliques dans les eaux superficielles ou souterraines ne sont pas connus. Il serait toutefois intéressant de vérifier si les conditions de pH et d'oxydo-réduction sont à même de permettre, très localement, la mise en solution de ces éléments métalliques. Le risque ne peut toutefois être écarté.

Dans la partie Sud des Préalpes, le Lias est franchement marin, les épaisseurs des différents niveaux le composant sont conséquentes et dépassent plusieurs centaines de mètres. La probabilité de retrouver des métaux en solution dans les eaux est donc très faible. Néanmoins, au niveau du secteur de Castellane, le Lias comprend un

niveau de calcaire ferrugineux épais (Kerckhove *et al.*, 1976). Il est donc possible de rencontrer du **fer** dans les eaux drainant ces terrains.

### Le Callovien

Il appartient au Jurassique inférieur et, dans la partie Nord des Préalpes, il existe des niveaux de calcaires à oolithes ferrugineuses (Plancherel *et al.*, 1998). Il est donc possible de retrouver du **fer** dans les eaux.

### L'Oxfordien

Il faut signaler l'existence de sources minéralisées, avec des teneurs en **fer** élevées, à mettre en liaison avec l'oxydation des pyrites contenues dans les « Terres Noires » de l'Oxfordien (Gidon *et al.*, 1980 ; Goncalves, 2003).

### Le Crétacé

Le Crétacé est représenté par quelques bancs de grès quartziques ferrugineux, comme ceux, par exemple, du Turonien, du Cénomaniens et du Santonien dans le secteur du Vaucluse (Goncalves *et al.*, 2000). La présence de **fer** dans les eaux du Crétacé est plus probable que dans les sédiments du jurassique, du fait de la présence de niveaux détritiques riches en oxydes de **fer**.

Dans les eaux des calcaires et des grès du bassin de Dieulefit, des teneurs anormalement élevées en **plomb** et en **cuivre** dans les eaux sont relevées. Il s'avère toutefois nécessaire de vérifier si ces concentrations ne sont pas en lien avec la corrosion des tubages. La présence de **fer** au niveau des émergences des calcaires de la forêt de Saou et dans les marno-calcaires de l'Est des Barronies-Est a également été relevée (Hole *et al.*, 1990).

Les gisements les plus importants en **fer**, mais également en **aluminium**, sont ceux contenus dans les formations bauxitiques. Ces formations sont facilement identifiables du fait de la couleur rougeâtre qu'elles laissent apparaître. Les plus importantes sont localisées sur le secteur Nord de Draguignan (Rousset, 1967), ainsi que dans d'autres concessions comme à Brignoles (Rouire *et al.*, 1974). Elles correspondent à des remplissages karstiques dans les calcaires secondaires.

Un autre exemple de localisation de tels milieux, et le plus connu, est celui des Baux-de-Provence. L'étage géologique associé est le Garumnien appartenant au Crétacé terminal (Bardossy, 1997).

Au niveau du centre bauxitique du Var, des mesures dans les eaux du Caramy et de la Ribeirotte, affluents de l'Argens, ont été effectuées. Elles circulent sur les formations secondaires ainsi que sur les bauxites. Les résultats sont les suivants : d'une façon générale, **fer** et **aluminium** ne semblent pas migrer sous forme soluble dans les eaux courantes (surtout le fer). La concentration en fer est en effet très faible (de l'ordre 25 µg/L). Elle est un peu plus élevée pour l'**aluminium** avec environ 50 µg/L. Ces deux éléments sont vraisemblablement évacués sous forme particulaire (Nicolas *et al.*, 1970). La mise en solution de l'**aluminium**, dans les eaux, nécessite des conditions de pH très basses que l'on peut rencontrer, dans de très rares cas, lorsqu'il y a oxydation

de la pyrite. Un enrichissement n'est cependant pas à exclure dans le cas d'un contact permanent et de longue durée entre l'eau et la bauxite finement divisée.

La présence de **chrome** dans des gammes de concentrations très basses mais significatives a été relevée dans les calcaires du Tithonique du massif des Bauges (Dematteis, 1995). Une concentration de 1.57 µg/L a ainsi été mesurée dans la source de Fontaine de la Rave. Cette source présente également des teneurs significatives en **manganèse** (35 µg/L), en **nickel** (1µg/L) et en **zinc** (7,71 µg/L) qui sont liées aux terrains fluvioglaciers qui composent également le système aquifère. Ces éléments ont aussi, mais dans une moindre mesure, été détectés dans la source du Plan d'eau du Châtelard. Dematteis explique la présence du **manganèse** par la mixité du système et par la présence d'argiles. L'écoulement en milieu poreux favorisant les interactions eau - roche participe également à l'enrichissement de ces sources.

### L'Eocène

Les grès sidérolithiques Eocène, affleurant sur la partie Nord des Préalpes, constituent un réservoir de médiocre qualité mais dont les teneurs en **fer** sont importantes en raison de la présence de limonite (FeO-OH, nH<sub>2</sub>O) (Kerrien *et al.*, 1998). Les eaux contenues dans cet aquifère peuvent être soumises à un fond géochimique naturel en **fer** significatif, en milieu réducteur.

Les flyschs ultrahelvétiques contiennent de la pyrite. La présence de **fer** en solution a été démontrée à la source de Marclaz avec une concentration de 1.1 mg/L (BRGM, 1990).

Dans les flyschs à helminthoïdes, un cas de contamination naturelle en **sélénium** est connu dans des sources du cirque d'Enchastrayes et dans les sources du Pré aux Chèvres, du Font de la Clapière et de la Fontaine Ronde. L'origine des eaux et des apports en sélénium n'a pas été identifiée à ce jour (Kerckhove *et al.*, 1974).

#### • Dans la nappe de Digne-les-Bains

Les calcaires et les marnes du Lias du secteur de Seyne, appartenant à la nappe de Digne-les-Bains, contiennent des indices miniers en métaux (**baryum**, **plomb**, **zinc** et **cuivre**).

Les indices métalliques sont dispersés. Une minéralisation en **cuivre** (filons et sills dans les spilites du Keuper terminal) est connue dans le ravin de Bréziers (Kerckhove *et al.*, 1983). Le passage en solution dans les eaux du **cuivre** dans ce secteur est cependant peu probable ou à des concentrations très basses.

#### • Dans les flyschs

Au Sud du massif cristallin des Ecrins, les grès du Champsaur (Eocène) affleurent largement. Cette formation sédimentaire détritique renferme quelques gisements de **plomb**, **zinc** et **baryum** autrefois exploités (Le Fort *et al.*, 1980). Les eaux des bassins situés à l'aval sont susceptibles de contenir ces éléments, en particulier le **zinc** et le **baryum**.

### • Quaternaire alluvionnaire et glaciaire

Les eaux souterraines et de surface des plus grandes vallées glaciaires des Alpes sont soumises à un risque de pollution en métaux d'origine anthropique du fait de l'importance de l'occupation du sol par les activités industrielles et agricoles. La présence de métaux dans les eaux est essentiellement liée à ce problème, si bien que la détermination du fond géochimique est rendue difficile même si parfois ce fond peut être important lorsque les niveaux du Trias sont traversés.

De nombreux cas de pollutions métalliques existent sur ce secteur. Par exemple, au niveau de la vallée de l'Arve, le **nickel** est présent dans les roches mais montre des faibles teneurs dans les eaux souterraines. La cause de cette faiblesse est la tendance du **nickel** à précipiter sous forme de carbonates en milieu faiblement basique. Les anomalies élevées en **nickel** dans les eaux souterraines de l'Arve sont vraisemblablement d'origine atmosphérique (Gouisset *et al.*, 1985) ou plus sûrement industrielle (données AERM&C 2006). C'est la contamination en **chrome** dans la vallée de l'Arve qui est la plus fréquemment rencontrée (Suais *et al.*, 1984).

D'autres cas de pollution dans les vallées des Alpes ont été reconnus. On citera ainsi la présence récurrente de **mercure** (jusqu'à 1.25 µg/g sur bryophytes) dans les eaux de la Durance à l'aval des Mées (AERM&C, 2004). Le **chrome** et le **cuivre** sont également à l'origine d'une pollution de la Luynes. Les concentrations de ces deux éléments dans les bryophytes du cours d'eau sont élevées (jusqu'à 29 µg/g pour le chrome et 219 µg/g pour le cuivre).

Un autre cas est celui de la basse vallée du Var. Cette zone est potentiellement soumise à un apport de métaux dans les eaux de surface et souterraines par l'activité industrielle des environs de Nice (Rampoux *et al.*, 2004) mais les mesures de l'Agence de l'eau ne confirment pas la présence d'éléments métalliques dans les eaux.

### **Rapport entre la lithologie et les éléments traces**

En résumé de ce chapitre sur les principales occurrences en éléments traces dans le secteur des Alpes externes hors cristallin, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 4). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Par manque d'information sur certains secteurs, il est possible qu'un ou plusieurs éléments soient oubliés ou encore que certaines suggestions concernant la présence d'éléments dans les eaux ne soient que des hypothèses impossibles à vérifier faute d'informations suffisantes. De ce fait, ce tableau ne montre qu'un simple aperçu des problèmes potentiels en éléments mineurs rencontrés, mais il peut apporter une aide précieuse dans la détermination de l'origine naturelle ou anthropique des concentrations élevées en éléments traces dans les eaux.

Encaissant		Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée dans les roches	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines	
Domaine préalpin	Houiller de la Mure	Fe Pb Zn	Fe Zn	
	Filons recoupant le Trias et le Lias	Pratiquement tous les éléments traces	As Ba F Fe Mn Zn	
	Trias	Gypses	Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Dolomies	Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Calcaires	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Cargneules	Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Spilites	Cu Fe Zn	Fe Zn
	Lias (secteur Castellane)	Calcaires	Fe	Fe
	Callovien (dpt 74)	Calcaires	Fe	Fe
	Oxfordien (secteur gap)	Terres Noires	Cu Fe	Fe
		Filons dans les Terres Noires	Ba Pb Zn	Ba
Crétacé (dpt 83)	Bauxites	Al Fe	Fe	
Eocène préalpin (dpt 74)	Flyschs	Fe	Fe	
	Grès sidérolithiques	Fe	Fe	
Domaine des flyschs	Eocène nummulitique (dpt 05)	Grès de Champsaur	Ba Pb Zn	Ba Zn
Nappe de Digne	Trias	Spilites	Cu Fe Zn Hg	Fe Zn
		Keuper	Cu Fe	Fe
	Lias	Filons dans les calcaires et les marnes	Ba Cu Pb Zn	Ba Zn

Tableau 4 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le domaine des Préalpes.

### **Conclusion sur le fond géochimique dans les Alpes externes sédimentaires**

Dans les Alpes occidentales, de fortes teneurs en éléments traces sont possibles dans les eaux de surface et souterraines au contact du Trias et notamment dans sa partie basale qui recouvre en discordance le socle hercynien. Les filons recoupant le Trias et la partie basale du Lias contiennent des sulfures métalliques de diverses natures et sont susceptibles de passer en solution dans les eaux par oxydation.

Dans les faciès du Jurassique, du Crétacé ou du Tertiaire, les minéralisations sont plus rares. Néanmoins il peut exister quelques niveaux détritiques riches en **fer** comme les grès ou la bauxite.

Globalement, pour les secteurs n'intéressant pas le Trias de cet ensemble, les eaux de surface et souterraines ne sont pas soumises à des teneurs importantes d'origine naturelle en métaux. En général, les eaux ont un faciès bicarbonaté calcique, et sont donc peu agressives. La mise en solution des métaux issus des roches est alors rendue difficile. Les seuls éléments susceptibles d'être présents sont essentiellement le **fer**, le **manganèse**, le **zinc** et le **baryum**.

### **3.2. LES ALPES INTERNES ET MASSIFS CRISTALLINS EXTERNES**

Dans ce secteur, comme précisé en début de rapport, ont été regroupées des formations de nature très variées qui appartiennent à la fois au domaine des Alpes internes (Figure 12) et aux massifs cristallins des Alpes externes.

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Les formations de la zone interne géologiquement très complexe ont été soumises à des « écrasements » et à des chevauchement intenses, la structure tectonique étant dominée par le développement des "nappes de charriage" qui se sont déplacées principalement et globalement de l'Est vers l'Ouest.

Les terrains rencontrés sont très variés :

- formations sédimentaires détritiques et carbonatées des domaines briançonnais, piémontais et austro-alpins (Carbonifère, Permien, Trias et Jurassique), schistes lustrés (sédiments jurassiques métamorphisés)
- formations cristallines (granites, gneiss, schistes et micaschistes) héritées du socle métamorphique hercynien, re-métamorphisé lors de l'orogénèse alpine, ou schistes formés par le métamorphisme alpin aux dépens des sédiments siliceux d'âge houiller, permien et triasique pour la zone interne ; ou encore socle métamorphique hercynien porté en altitude mais non affecté par le métamorphisme alpin pour les massifs cristallins externes du Mont-Blanc, des Aiguilles Rouges, du Beaufortain, de Belledonne, du Pelvoux et de l'Argentera.

La Figure 12 met en évidence cette hétérogénéité de faciès.

Les éléments métalliques présents dans les eaux de surface et souterraines sont fonction du contexte géologique local. Pour cette raison, la différenciation de plusieurs unités géologiques est importante pour une meilleure approche des problèmes liés aux métaux dans les eaux.



en **arsenic** (jusqu'à 30 µg/L) et **baryum** (environ 10 µg/L) se rencontrent dans les eaux souterraines des granites du Mont Blanc (Dubois et Parriaux, 1990). De telles valeurs ont également été relevées par la DDASS de la Savoie qui en 2002 mesure 20 µg/L d'**arsenic** et 7 µg/L d'**antimoine** dans des captages d'eau souterraine de la commune des Houches. A Chamonix, les valeurs en arsenic se situent également autour de 20 µg/L. Les gneiss des Aiguilles Rouges bordant ce massif contiennent des sulfures d'**arsenic** pouvant donner aux eaux un fond géochimique naturel élevé (Dubois, 1991 ; Dubois et Parriaux, 1990 ; Van de Velde *et al.*, 2000, données AERM&C). Dubois et Parriaux (1990) se sont également intéressés à la variabilité saisonnière et interannuelle de la chimie des eaux souterraines dans ces massifs. Pour les éléments traces, on retiendra que le **fluor** ne varie pas dans le temps. Ces auteurs ont également étudié la variabilité spatiale des concentrations. Les teneurs en **arsenic** sont ainsi très variables spatialement (de 0 à 30 µg/L) bien que la plupart des échantillons prélevés présentent des valeurs significatives pour cet élément. Pour le **baryum**, la situation est un peu différente. Les teneurs significatives sont plus rares et localisées à la limite entre les granites du massif du Mont-Blanc et les rhyolithes qui le bordent à l'Est.

Des mesures réalisées par l'EDYTEM (communication personnelle) confirment la présence d'**arsenic** dans les sources des Massifs du Mont-Blanc (0 à 10 µg/L) et des Aiguilles Rouges (25 et 60 µg/L). Il en est de même pour le baryum pour lequel ces mesures montrent des teneurs comprises entre 2 et 30 µg/L.

L'origine des fortes teneurs en éléments traces, en amont des bassins versants du secteur du Mont Blanc, est donc bien naturelle pour l'**arsenic** et le **fluor**. Elle est en revanche anthropique pour les autres éléments traces avec des concentrations très faibles de l'ordre de quelques ng/l (Parriaux, 1997). La proximité de la vallée industrialisée de l'Arve du secteur de Chamonix contribue à un apport en métaux. En effet, les rejet atmosphériques des usines, et le trafic routier intense, accroissent les concentrations en métaux dans l'air. Ces éléments repris par les précipitations se retrouvent ensuite dans les eaux en tête des bassins versants (Dubois et Parriaux, 1990).

### **Massifs de Belledonne et du Beaufortain**

Les eaux provenant du massif de Belledonne sont localement très minéralisées en raison de l'abondance de filons de sulfures métalliques. En revanche les eaux issues des schistes houillers sont souvent peu minéralisées (Antoine *et al.*, 1983).

Il existe quelques sources aux eaux très minéralisées entre La Chambre et Saint-Jean-de-Maurienne, qui drainent les formations triasiques avant de se jeter dans l'Arc, qui peuvent contenir certains éléments métalliques dont l'origine est probablement mixte (Antoine *et al.*, 1983). En effet, le substratum triasique riche en sulfates et chlorures, ainsi que les activités industrielles de la vallée sont sources de contamination pour les eaux de surface et souterraines. Dans les formations alluviales de la basse vallées de l'Arc et de l'Isère en Combe de Savoie, pour ce qui concerne l'**arsenic** et l'**antimoine** une étude de l'EDYTEM (2004) réalisée pour le compte du Conseil Général de Savoie, montre que les teneurs sont inférieures au seuil de détection (10 µg/L pour l'**arsenic** et 5 µg/L pour l'**antimoine**). En revanche, dans des sources du massif de la Lauzière, entre Arc et Isère, ce même laboratoire a mis en évidence la présence

d'arsenic dans une gamme de concentrations variant de 4.4 à 104 µg/L (EDYTEM, communication personnelle). Ailleurs dans le massif de Belledonne, les sources étudiées par l'EDYTEM montrent des concentrations anormalement élevées de l'ordre de quelques µg/L.

La richesse en éléments traces des eaux du massif de Belledonne est confirmée pour l'**arsenic** et l'**antimoine**, comme le montre un rapport d'étude de l'ENGREF (2002). Les analyses réalisées sur les eaux des réseaux de distributions d'eau potable font par ailleurs état de teneurs en **arsenic** supérieures à la norme de potabilité pour plusieurs ressources captées. Les concentrations peuvent atteindre plusieurs dizaines de µg/L. Dans le Beaufortain, la présence d'arsenic est également avérée. Des concentrations de 2.1 et 9.5 µg/L ont été mesurées dans deux sources du massif (EDYTEM, communication personnelle). Le **baryum** est également présent (6 et 64 µg/L).

Enfin les roches basiques et ultrabasiques du massif de Belledonne renferment des filons contenant de nombreux métaux comme l'**argent**, le **nickel**, le **mercure**, l'**antimoine**, le **plomb** dans les amphibolites et comme le **chrome** pour les gabbros et les serpentines (Barfety *et al.*, 1972 et 1984 ; Barbier *et al.*, 1977). Il est alors possible de retrouver certains de ces éléments comme l'**antimoine** et le **nickel** dans les eaux.

D'après l'Agence de l'eau Rhône – Méditerranée & Corse (2004), des valeurs significatives en **nickel** ont été relevées sur les bryophytes de l'Arly à l'aval de Megève (jusqu'à 1020 µg/g). Selon les conclusions de l'AERM&C, le nickel serait cependant d'origine anthropique et lié à l'insuffisance des systèmes épuratoires en hiver.

### **Massifs du Pelvoux et de l'Oisans**

Du point de vue des occurrences en éléments métalliques dans les eaux, la situation est comparable à celle de Belledonne. Ceci s'explique par la présence de nombreux filons de sulfures, aussi bien dans les schistes que dans les granites ou les gneiss (Le Fort *et al.*, 1980 ; Barbier *et al.*, 1976).

On note également la présence d'arsenic sur certains captage d'Auris en Oisans (DDAF 38, 2006)

Dans ses rapports annuels sur la qualité des cours d'eau (2001 à 2005), l'AERM&C signale dans ce secteur, et dans les eaux de La Romanche en particulier, la présence d'**arsenic** d'origine naturelle (jusqu'à 148 µg/g sur bryophytes et 25 µg/g sur sédiments).

## Massif de l'Argentera

Peu de références bibliographiques ont été recensées sur le secteur de l'Argentera en ce qui concerne les éléments traces. Cependant, des gisements de **plomb**, **zinc**, **baryum**, **cuivre** et **fer** sont connus (Lanteaume *et al.*, 1991), si bien que des teneurs significatives en élément traces dans les eaux sont possibles, surtout pour le **fer**, le **zinc** et le **baryum**.

### • Unités ultra-dauphinoises, briançonnaises et sub-briançonnaises

Ces unités sont situées entre le socle hercynien et les schistes lustrés et forment une bande de plusieurs dizaines de kilomètres de large que l'on peut suivre de la Suisse jusqu'à l'Argentera. Les terrains rencontrés sont sédimentaires et sont datés du Permien jusqu'au Crétacé inclus. Les formations les plus épaisses sont celles du Trias avec des faciès souvent gypseux et volcaniques dans sa partie inférieure.

Les occurrences en éléments traces les plus importantes sont rencontrées dans les formations gypseuses triasiques (Debelmas *et al.*, 1988 ; Mandia, 1991).

Il s'agit essentiellement du **baryum**. D'autres éléments traces sont rattachés à l'encaissant gypseux triasique comme le **fer**, le **manganèse**, le **plomb**, l'**aluminium**, le **zinc**, le **nickel** (plus rare) et le **cuivre** (surtout au contact entre le Permien et le Trias, Campredon *et al.*, 1980 ; Debelmas *et al.*, 1989).

Les concentrations en **fer** et en **manganèse** dans les eaux de surface et souterraines sont généralement associées à une origine géogène donc naturelle. Le manganèse est souvent associé au fer, et se retrouve surtout au contact entre le socle hercynien et les unités briançonnaises et sub-briançonnaises, dans les formations volcaniques et volcano-sédimentaires du Trias inférieur (spilites). Un exemple est celui de la source de Treicol (73) où les teneurs en fer sont élevées, et dont les tufs sont parfois colorés en rouge (Antoine *et al.*, 1993).

En ce qui concerne le **cuivre** et le **zinc**, il n'existe pas de relation nette entre teneurs dans les roches et dans les eaux. Néanmoins, l'origine du cuivre dans les eaux souterraines est essentiellement liée aux aquifères formés principalement de roches sulfatées-calciques de la base du Trias (Mandia, 1991). Il est probable que les concentrations en cuivre dans les eaux, issues de cet encaissant, soient relativement faibles.

Pour l'**aluminium**, une contamination des eaux souterraines est plus probable dans un encaissant calcaro-dolomitique que gypseux (Mandia, 1991). Sa mise en solution est difficile dans un environnement carbonaté du fait de la neutralité du pH.

Le **plomb** est un élément présent dans les minéraux carbonatés et les sulfures. Il peut se trouver en solution dans les eaux souterraines des formations triasiques gypseuses, mais à des teneurs toujours faibles, de l'ordre de quelques µg/L et donc inférieures à la norme de potabilité. Toutefois, comme le rappelle Dematteis (1995), l'interprétation du plomb dans les eaux est rendue difficile car il peut être transporté sous forme colloïdale.

Globalement, les occurrences en éléments traces les plus importantes dans les eaux souterraines sont à prévoir aux contacts entre le socle et le Trias et entre les dépôts houillers du Permien et les grès et pélites de la base du Trias, et dans les premiers niveaux de la base du Trias (Antoine *et al.*, 1993 ; Gidon *et al.*, 1978).

En ce qui concerne les eaux de surface de ce secteur, peu de références existent. On citera toutefois les résultats du Réseau National du Bassin RM&C (2004) qui mettent en évidence la présence d'**arsenic** d'origine naturelle dans les eaux du Doron de Bozel - Vanoise (jusqu'à 7.4 µg/g sur bryophytes et 15.3 µg/g sur sédiments).

#### • Schistes lustrés et ophiolites

Les eaux des schistes lustrés présentent certaines analogies avec les eaux des terrains houillers Briançonnais du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques (Debelmas *et al.*, 1988 ; Barfety *et al.*, 1996). Les eaux sont généralement faiblement minéralisées et localement la présence de quelques éléments traces est possible lorsque l'encaissant devient basique (ophiolites).

Par exemple, les eaux circulant sur les flyschs de la Tarentaise peuvent contenir des éléments traces comme le **fluor**, l'**arsenic** et le **fer** (« boues rouges ») (Antoine *et al.*, 1993).

Quelques gisements de **cuivre** sont localisés dans les schistes lustrés (Fudral *et al.*, 1994) et peuvent contribuer à un fond géochimique un peu plus élevé mais toujours inférieur à la norme.

#### • Formations quaternaires

Les eaux des alluvions des vallées les plus importantes sont très souvent contaminées par les métaux dont l'origine anthropique est prouvée (Veysseyre *et al.*, 2001 ; Ferrari *et al.*, 2002). Un exemple est celui de la contamination en **chrome** dans la vallée de l'Arve par les industries de décolletage et de traitement de surface (Suais *et al.*, 1984). L'Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée et Corse (2004) mentionne également la présence de **chrome** et de **nickel** d'origine anthropique dans les eaux de l'Isère à l'amont de Grenoble (jusqu'à 7 µg/L de chrome et 28 µg/L de nickel) et dans le Drac à l'exutoire de son bassin versant (jusqu'à 7 µg/L de chrome et 3.8 µg/L de nickel). Dans le Drac, une pollution par le mercure a également été identifiée (0.6 µg/g de mercure sur bryophytes)

Cependant, il peut exister dans certaines zones des teneurs en éléments traces élevées dont l'origine est naturelle comme dans la vallée de l'Arc à l'aval de Saint-Jean-de-Maurienne. Les eaux de l'Isère et de certains de ses affluents qui drainent les massifs cristallins de Belledonne, des Grandes Rousses, et de l'Oisans s'enrichissent également en éléments traces. Ainsi, des concentrations de plusieurs dizaines de µg/L d'**arsenic** et d'**antimoine** sont mesurables sur les sources (EDYTEM, 2004).

### **Rapport entre la lithologie et les éléments traces**

En résumé de ce paragraphe sur les principales occurrences en éléments traces dans les Alpes internes, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 5). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Unité géologique	Encaissant	Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
Massif cristallin du Mont Blanc	Granites	Cu F Fe	F Fe
	Gneiss	As Ag Cu Pb Zn	As
	Micaschistes, schistes et cornéennes	Cu Fe Pb Zn	Fe
Massif cristallin de Belledonne	Amphibolites et autres roches basiques (gabbros...)	Pratiquement tous les éléments traces	Al As Ba Cr Fe Mn Sb
	Gneiss amphibolitiques	Ag Fe Pb Zn	Fe
	Gneiss à deux micas	Cu Fe Pb Zn	Fe
	Leucogranites calco-alcalins	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe
	Chloritoschistes et séricitoschistes	As Ba Cu Fe Pb Zn	As Ba Fe
	Micaschistes	Cu Fe Mn Pb Zn	Fe Mn
Massif cristallin du Pelvoux, Oisans	Anatexites	As Ba Sb Zn	As Ba Sb
	Migmatites	Cu	
	Spilites	Ba Cu Fe Mn Pb	Ba Fe Mn
	Amphibolites et autres roches basiques (gabbros...)	Pratiquement tous les éléments traces	Al As Ba Cr Fe Mn Sb
	Micaschistes	Ba	Ba
	Gneiss	Ba Cu Pb Zn	Ba
Massif cristallin de l'Argentera	Granites	Ba Cu Fe Pb	Ba Fe
	Socle indifférencié	Pratiquement tous les éléments traces	Al As Ba Cr Fe Mn Sb
Unités briançonnaise et subbriançonnaise	Cargneules et grès Trias	Fe Pb	Fe Pb
	Dolomies et calcaires Trias	Ba Cu F Fe Mn Pb Zn	Ba F Fe Mn Zn
	Quartzites Trias	Ag Cu Fe Pb Zn	Fe
	Schistes houillers et grès Permien	Ag Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
	Calcaires	Ba Cu Fe Mn Pb Zn	Ba Fe Mn Zn
	Tufs et travertins	Fe	Fe
Schistes lustrés	Schistes lustrés	Ag Cu Fe Pb	Fe
	Amphibolites	Cu Fe	Fe
Massif cristallin du Grand Paradis	Micaschistes Permo-Trias	Cu Fe Pb Zn	Fe
	Gneiss	Cu Fe Pb	Fe
	Migmatites	Cu	

Tableau 5 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le secteur des Alpes internes.

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Les problèmes les plus importants de contaminations naturelles par les éléments traces dans les eaux de surface et souterraines existent globalement sur tout le domaine des Alpes internes et des massifs cristallins externes, à l'exception, peut être des schistes lustrés et des formations sédimentaires post-triasiques.

Les formations les plus susceptibles d'être à l'origine de fonds géochimiques élevés sont les niveaux gypseux du Trias issus des unités ultradauphinoises, briançonnaises et sub-briançonnaises, ainsi que les filons de sulfures du socle hercynien. Les roches basiques (amphibolites, serpentines, gabbros, dolérites...) du socle hercynien et du socle du Grand Paradis sont également porteuses de métaux facilement mobilisables par les eaux aux propriétés agressives.

L'estimation du fond géochimique naturel en métaux dans les eaux au niveau des Alpes internes est rendue difficile en raison de la grande variété des formations présentes sur les impluviums..

### **3.3. LE BASSIN MOLASSIQUE LEMANIQUE**

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Le bassin molassique lémanique (Figure 13) est le domaine sédimentaire situé entre le massif du Jura et les Alpes. Il est d'âge Miocène et les formations présentes sont typiques de dépôts de milieux de dépôts continentaux et marins, les terrains sont essentiellement constitués de sables, d'argiles, de conglomérats, de grès et même de gypses (plus en profondeur et donc non affleurant). Les formations glaciaires quaternaire qui reposent sur la molasse sont également bien représentées sur l'ensemble du domaine.

L'ensemble molassique est discordant sur le secondaire et son épaisseur dépasse plusieurs centaines de mètres, toutefois ses caractéristiques hydrauliques sont médiocres et la molasse est peu aquifère.

Les formations glaciaires que l'on retrouve sous forme de placages, de sillons surcreusés dans la molasse ou sous la forme de terrasses qui jalonnaient l'ancien glacier rhodanien en particulier au sud du lac Léman (Evian, Thonon) constituent en revanche des aquifères très intéressants, les dépôts glaciaires des terrasses du Bas Chablais s'étant accumulés en certains secteurs sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Ce sont les eaux des aquifères des milieux glaciaires qui sont les plus exploitées en raison de leur abondance et de leur très bonne qualité physico-chimique en dehors des zones de forte pression agricole ou anthropique.



d'origine naturelle et elles sont à mettre en relation avec la présence d'un milieu réducteur local favorisant une mise en solution des métaux (Eberentz, 1990 ; Eberentz *et al.*, 1988). Les teneurs en **fer** et **manganèse** sont accentuées lorsque les sols contiennent des éléments calcaires sinémuriens (Baize, 1997).

Dans le cas du sol du pays de Gex, de très fortes teneurs en **nickel**, **cuivre** et **chrome** dans les horizons labourés existent (Buatier, 1994). Le lessivage de ces terres entraîne ces métaux sous forme particulaire et dissoute dans les eaux de surface. Il n'est pas mentionné de teneurs dans les eaux, mais il est probable que la phase particulaire contienne plus de métaux que la phase dissoute. L'origine de ces métaux ne peut pas être attribuée à une contamination humaine car les teneurs continuent de croître dans les horizons profonds (Baize, 1997). Elles sont dues à une anomalie géochimique typique des moraines glaciaires du plateau Suisse par l'existence de débris de roches ultra-basiques (Célarin *et al.*, 1989).

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Les teneurs naturelles élevées en éléments traces sur le bassin molassique lémanique dans les eaux de surface et souterraines sont rares et ne concernent que très localement des éléments comme le **fer** et le **manganèse** dans les formations glaciaires.

Cependant, il a été montré que dans les eaux profondes de la molasse, il existe des concentrations un peu plus fortes en **cuivre**, **baryum** et **chrome**, dues à la nature basique et ultrabasique des sédiments détritiques alpins.

## **3.4. LES BASSINS TERTIAIRES DU SILLON SAONE – RHONE ET BAS DAUPHINE (BRESSE, DOMBES, BAS DAUPHINE)**

### ***Rappel sur le contexte géologique***

Les bassins tertiaires de la Bresse, des Dombes et du Bas-Dauphiné (Figure 14) s'étendent de Dijon jusqu'à Valence et forment une vaste plaine d'une cinquantaine de kilomètres de large. Ce secteur est caractérisé par une absence de relief et de fortes activités industrielles et agricoles.

Ces bassins sont le résultat du déchirement de la croûte continentale durant l'Oligocène. Cette phase d'extension a créé de nombreuses failles normales, visibles encore sur la bordure à l'Ouest. En revanche, la limite Est est représentée par un chevauchement majeur. Il s'agit du recouvrement des terrains sédimentaires plissés du Jura sur les matériaux tertiaires qui est dû à la mise en place des Alpes après l'Oligocène.

Les formations rencontrées sur ces bassins ont une origine détritique et sont datées de l'Oligocène au Pliocène. Elles ont reçu des apports de sédiments des massifs avoisinants, Massif Central, Jura et Alpes par l'intermédiaire des cours d'eau qui les



(Gouisset *et al.*, 1985), 9 analyses révèlent des concentrations en **fer** supérieures à 0.2 mg/L.

Pour le **manganèse**, toujours pour le Miocène, dans la bibliographie consultée seulement 3 points sur 35 analyses dépassent 0.1 mg/L dans les eaux souterraines miocènes (Gouisset *et al.*, 1985).

Les sables de la base du pliocène de la moyenne vallée du Rhône présentent souvent des teneurs élevées en fer et manganèse comme en ammonium à lier aux conditions de milieu - réducteur (Rémi de La Vaissière, 2006)

Pour tous les éléments métalliques autres que le **fer** et le **manganèse**, il n'y a rien à signaler qui soit imputable à des anomalies d'origine naturelle. Celles constatées sont très aléatoires et sont liées aux matériaux des ouvrages captant ou de distribution sur lesquels on prélève (corrosion métalliques des tubages, des conduites ou des réservoirs) (Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée – Corse, 1991).

En ce qui concerne les dépôts tertiaires bressans, le même constat est fait, à savoir que seul le **fer** et le **manganèse** sont concernés. Cependant il existe un niveau de marnes pisolithiques dans le Pontien pouvant donner un fond géochimique en **fer** plus important (De Blic *et al.*, 1972). Les eaux souterraines pontiennes sont très minéralisées (Jauzein *et al.*, 1972).

### 3.5. LES BASSINS TERTIAIRES PROVENÇAUX

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Les bassins de sédimentation tertiaires sur le secteur provençal sont nombreux. Les plus imposants sont les bassins d'Apt, de Carpentras et de Valréas (Figure 15).

Les bassins de Valréas et de Carpentras, situés en rive gauche du Rhône et encadrés à l'Est par les reliefs des Baronnies, et des monts du Vaucluse sont les plus importants, ils s'étendent sur environ 1000 kilomètre-carré. Ces deux grandes structures synclinales sont remblayées avec des dépôts détritiques (sables, argiles, conglomérats...) datés essentiellement du Miocène et de l'Oligocène. L'épaisseur de ces dépôts dépasse plusieurs centaines de mètres au centre des bassins.

Le bassin d'Apt, s'étend entre les Monts du Vaucluse au Nord et le Lubéron au Sud. Les dépôts détritiques sont plus marneux et également plus récents (Vindobonien) comme dans le val occupé par la basse vallée de la Durance.

Enfin, le bassin de l'Arc ou d'Aix - Gardanne localisé plus au Sud, s'étend entre les reliefs, au Nord, des chaînons de la Fare, des collines d'Eguilles, les coteaux d'Aix et la montagne Sainte-Victoire et au Sud, de la barrière montagneuse de la Nerthe de l'Etoile, du Regagnas, de l'Olympe et de l'Aurélien.

Le bassin s'étend vers l'ouest jusqu'au-delà de l'étang de Berre et se referme à l'Est dans la région d'Ollières. Dans cette unité synclinale se sont régulièrement accumulés sur un substratum jurassique ou crétacé inférieur, les formations marines du Santonien, puis les dépôts fluviolacustres du Campanien, du Maestrichtien et de l'Eocène. A l'Ouest les assises éocènes et crétacés disparaissent sous les épaisses formations de l'Oligocène.

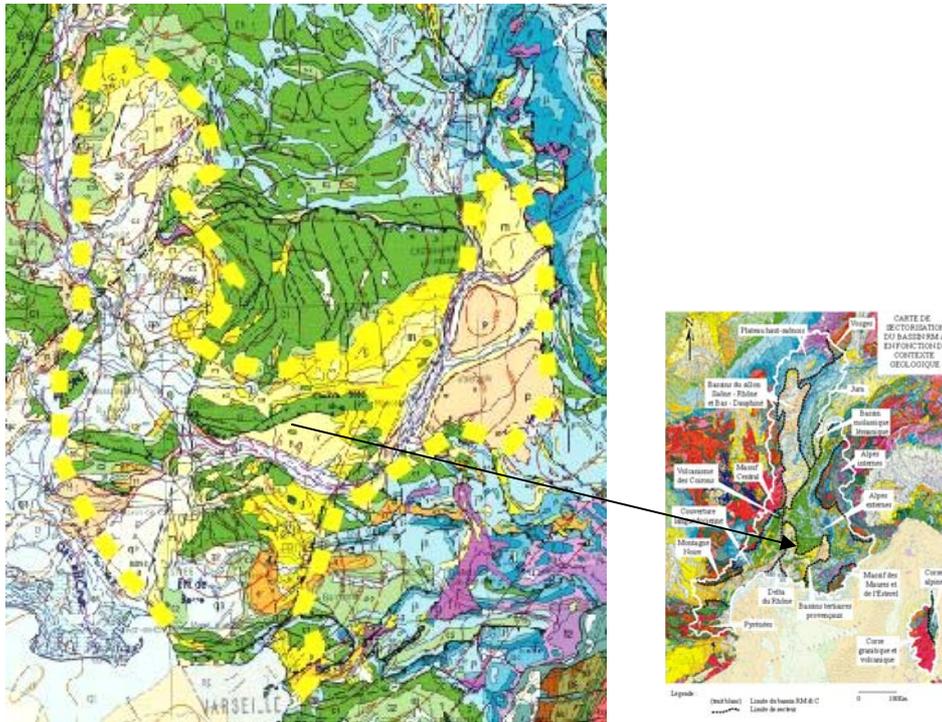


Figure 15 : Carte géologique des bassins tertiaires provençaux (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### Les principales occurrences en éléments traces

Les occurrences en éléments traces dans les eaux des aquifères tertiaires provençaux sont les mêmes que pour les autres bassins tertiaires du bassin RM & C. Autrement dit, elles ne concernent que les éléments **fer** et **manganèse**. Les cas les plus courants appartiennent au domaine alluvial de la Durance (Sylvestre, 2000).

Globalement, les sédiments tertiaires provençaux sont généralement des dépôts de milieux de faible profondeur, si bien que certains étages géologiques contiennent des niveaux de carbonates riches en oxydes de **fer** (limonite) comme le Fuvélien (Gonzales, 2000b) et l'Oligocène (Gonzales, 2000a).

Le bassin de Valréas abrite une nappe importante captive dans des sédiments essentiellement gréseux, sous la couverture marneuse pliocène. Les eaux contenues dans les grès sont anciennes (plus de 30 000 ans) et sont donc potentiellement minéralisées par dissolution du réservoir gréseux et peuvent contenir des éléments

comme le **fer** et le **manganèse** (Travi *et al.*, 2000 ; Huneau, 2000). Huneau signale ainsi des concentrations en **fer** pouvant dépasser 1 à 2 mg/L dans les eaux souterraines du bassin de Valréas.

De fortes teneurs en **arsenic** dans les eaux sont présentes dans le bassin d'Aix-Gardanne et semblent liées aux activités industrielles et viticoles abondantes autour des villes d'Aix-en-Provence et de Marseille (Ancel *et al.*, 2004).

Sur ce même secteur, au niveau du plateau d'Arbois, il a été décelé, dans certains captages, des teneurs en **fer** d'origine naturelle parfois élevées dans les eaux souterraines, de l'ordre de 0.5 mg/L (BRGM, 1999).

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Peu de références mentionnent la présence de teneurs significatives en métaux dans les formations détritiques des bassins provençaux. Néanmoins on peut s'attendre à quelques problèmes de contaminations naturelles en **fer** et **manganèse** (peut être aussi en **aluminium**) des eaux souterraines liées à la nature des sédiments.

Pour les autres éléments traces, rien de particulier n'a été mentionné. L'existence de fortes teneurs dans les eaux est à mettre en relation avec une contamination d'origine anthropique, comme par exemple le **cadmium** et le **mercure** à la source de Font Marignane (Gravost, 1991) ou encore l'**arsenic** dans le bassin d'Aix-Gardanne.

## **3.6. LA CORSE ALPINE**

### ***Rappel sur le contexte géologique***

Située sur toute la bordure Nord-Est, la Corse alpine est géologiquement composée de terrains cristallins mais également d'un petit bassin sédimentaire miocène qui s'étend dans la partie Sud de la zone concernée (Figure 16). Ce dernier renferme des matériaux détritiques fins (sables...) provenant des reliefs situés plus à l'Ouest.

Les faciès appartiennent au domaine alpin et sont essentiellement des schistes lustrés et calschistes (carbonates jurassiques métamorphisés) - Cap corse, des gabbros, des amphibolites et des serpentines (roches basiques et ultrabasiques).

Il est aussi possible de rencontrer d'autres types de roches comme des orthogneiss (à proximité de Bastia) et des roches sédimentaires secondaires et tertiaires bordant les granites sur le secteur de Corte.

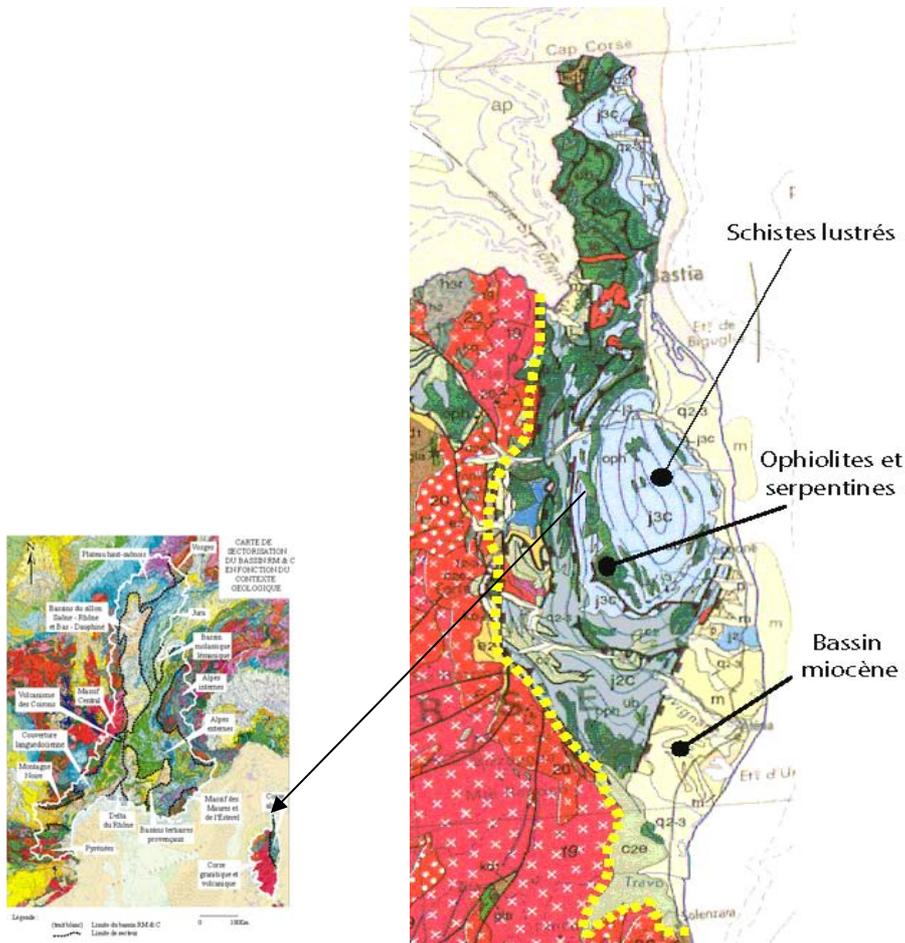


Figure 16 : Carte géologique de la Corse alpine (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### Les principales occurrences en éléments traces

Les occurrences en éléments traces sont nombreuses sur cette partie de la Corse. Un certain nombre d'études sur les problèmes en métaux dans les eaux à l'aval des sites miniers ont été réalisées, et montrent que localement le fond géochimique naturel est élevé pour quelques éléments traces.

Au niveau de la zone du Cap Corse, les anomalies dans les eaux sont avant tout liées à l'**antimoine**, avec parfois ponctuellement des teneurs élevées en **fer** et **manganèse** (BRGM, 1996). Pour ces métaux, le fond géochimique naturel est élevé même si celui-ci est également lié à la présence de mines.

Sur cette zone, des mesures en **antimoine**, **fer** et **manganèse** sur les eaux souterraines ont montré que sur 42 prélèvements, 13 dépassent le seuil de potabilité de 10 µg/L pour l'**antimoine**, 4 dépassent celui du **manganèse** (50 µg/L). Pour le **fer**,

les teneurs sont souvent à la limite de la norme de potabilité (200 µg/L), une valeur de 370 µg/L a été cependant mesurée (BRGM, 1996).

Sur ce secteur, les fortes occurrences en **antimoine** touchent particulièrement les eaux superficielles de trois bassins :

- le bassin d'Ersa : avec des teneurs dépassant 500 µg/L pour l'**antimoine**. Le **fer** et le **manganèse** sont également présents en quantité non négligeable sur ce secteur.
- le bassin de Méria : la mesure la plus importante est de 139 µg/L.
- le bassin de Luri : les valeurs atteignent parfois 100 µg/L.

De telles concentrations sont accentuées par la présence d'exploitations souvent anciennes des gisements d'antimoine (mines d'antimoine de Méria pour les plus célèbres).

Il est à signaler que les eaux du bassin de Rogliano contiennent des teneurs en **antimoine** pouvant dépasser 10 µg/L attribuées à un fond géochimique local (BRGM, 1996).

Pour le **fer**, la source d'Orezza a des teneurs élevées. La plus forte valeur mesurée est de 26 mg/L (Guieu *et al.*, 1990). Il en est de même pour la source d'Ornaso, sans toutefois avoir noté de concentrations (Jauzein *et al.*, 1976).

Des teneurs importantes en **antimoine** et en **arsenic** ont été mesurées dans les eaux de surface du bassin de la Bravone : 51 à 161 µg/L pour l'arsenic dans les eaux de la Bravone, et 10 à 141 µg/L dans les eaux souterraines pour ce même élément dans la nappe alluviale associée (BRGM, 1994 ; BRGM, 1995a). Cette contamination est liée aux anciens travaux miniers de Matra. Ailleurs, les données ne montrent pas de teneurs significatives pour ces deux éléments. Des mesures réalisées dans des sources ont toutes donné des valeurs inférieures au seuil de détection de 5 µg/L.

Dans l'encaissant basique et ultrabasique, de nombreux métaux sont présents comme le **cuivre**, le **fer**, le **manganèse**, le **nickel**, l'**antimoine**, l'**arsenic** et plus rarement le **mercure** dans les gabbros et les serpentines dans un secteur à l'Est de Corte (Rossi *et al.*, 1994 ; Bouladon *et al.*, 1968 ; Lahondère *et al.*, 1983). Du fait de l'agressivité des eaux sur de tels terrains, il est probable de retrouver ces éléments en solution dans les eaux.

Pour les éléments comme le **nickel** et le **chrome**, le fond géochimique dans les roches est plus élevé qu'ailleurs en raison de la nature de l'encaissant ultrabasique (BRGM, 1995a).

Enfin, en ce qui concerne le domaine alluvial et le bassin miocène au Sud de Bastia, les eaux contenues dans le substratum miocène sont légèrement ferrugineuses. Leurs caractéristiques physico-chimiques se rapprochent de celles des eaux des roches métamorphiques (Ferrandini *et al.*, 2000).

Le bassin versant du Golo est le plus étendu de Corse. La vallée du Golo offre une ressource en eau intéressante présente dans les alluvions. Cet aquifère est vulnérable à la pollution anthropique. Toutefois la présence de métaux comme le **fer** et le **manganèse** dans les eaux souterraines est naturelle (Lahondère *et al.*, 1994). Aucune concentration en **fer** et en **manganèse** particulière n'est mentionnée dans les eaux de surface.

### **Rapport entre la lithologie et les éléments traces**

En résumé pour ce secteur sur les principales occurrences en éléments traces, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 6). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Encaissant		Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
Schistes lustrés		Fe Mn Pb Sb Zn	Fe Mn Sb
Amphibolites		Cu Fe	Cu Fe Ni
Serpentines		Cu Fe Ni	Fe (Ni plus rare)
Calschistes		Fe Mn	Fe Mn
Cipolins		Fe Mn	Fe Mn
Schistes à amphibolites		Cu Fe Pb	Fe
Filons	Au contact entre schistes et gneiss et entre schistes et serpentines	As Fe	As Fe
	Dans serpentines	As Fe	As Fe
	Autres	Cu Fe	Fe

Tableau 6 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la Corse alpine.

### **Conclusion sur le fond géochimique**

Les anomalies rencontrées pour l'**antimoine** sont d'origine naturelle accentuées par les activités minières passées. Des teneurs en **fer** et en **manganèse** sont identifiées. Elles sont surtout présentes dans les schistes lustrés du Cap Corse.

L'**arsenic** est localement présent comme au niveau de l'axe La Porta - Matra et dans le bassin versant de la Bravone, localement il peut y avoir un fond géochimique élevé.

Pour l'encaissant basique et ultrabasique dans son ensemble, de nombreux métaux y sont présents comme le **cuivre**, le **fer**, le **manganèse**, le **nickel**, l'**antimoine**, l'**arsenic** et plus rarement le **mercure**. Du fait de l'agressivité des eaux sur de tels terrains, il est probable de retrouver ces éléments en solution dans les eaux.

### 3.7. LA CORSE GRANITIQUE ET VOLCANIQUE

#### **Rappel sur le contexte géologique**

Englobant plus de 75% de la surface de l'île, la Corse granitique et volcanique est composée de terrains cristallins mais également de formations volcaniques et sédimentaires situées sur la partie Nord-Ouest au niveau de Calvi (Figure 17). Ces dernières renferment essentiellement des basaltes provenant de coulées datées de la fin de l'ère primaire ainsi que des dépôts continentaux schisteux du Permien (bassin houiller d'Osani), qui se prolongent en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur et qui affleurent notamment au niveau du massif de l'Esterel dans le département du Var.

Les terrains cristallins diffèrent de ceux de la Corse alpine, dont les formations sont essentiellement schisteuses, puisqu'il s'agit principalement de granites hercyniens.

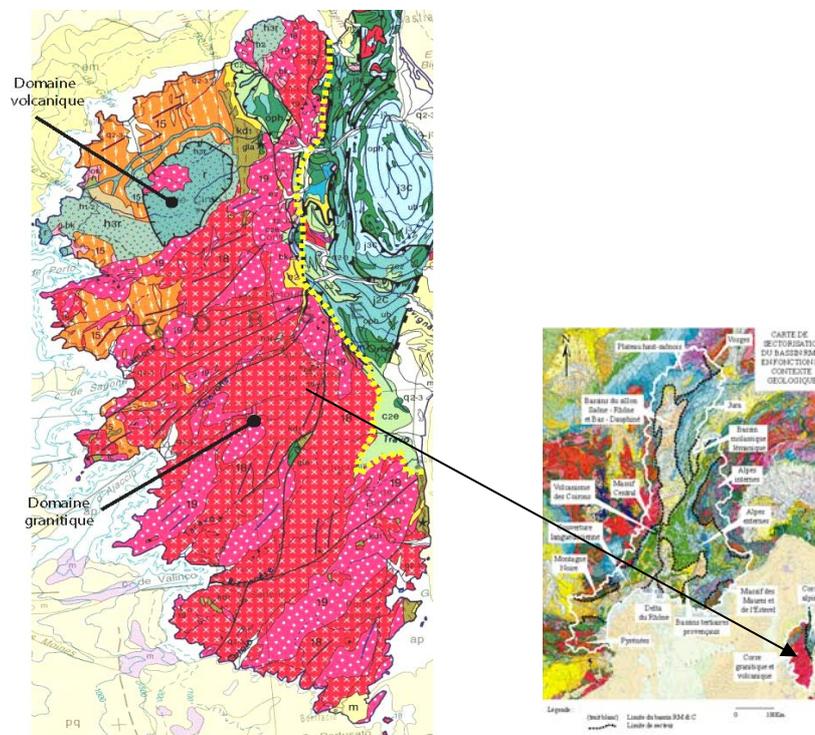


Figure 17 : Carte géologique de la Corse granitique et volcanique (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

#### **Les principales occurrences en éléments traces**

Les occurrences en éléments traces sont moins nombreuses que pour la Corse alpine, et concernent le plus souvent la zone volcanique et sédimentaire ainsi que sa périphérie. Pour le grand domaine granitique, les informations sur les éléments traces sont plus rares et traitent principalement des métaux rencontrés dans les sulfures sous forme de filons.

Les problèmes de métaux dans les eaux sont le plus souvent liés aux activités minières, et donc ils ne sont pas attribués à un fond géochimique naturel. Des rapports d'étude du BRGM mentionnent les conséquences des activités minières sur la qualité de l'eau à l'aval des mines. Les exemples sont nombreux :

- Sur le secteur de l'Île Rousse-Lozari, la contamination en **arsenic** sur les champs captant AEP est possible du fait de l'existence d'anciennes mines (BRGM, 1994).
- A Pietralba, une vaste zones de mines et d'indices miniers est présente (**cuivre, plomb, zinc**). Ces éléments sont relativement dispersés et il est difficile d'individualiser des secteurs plus sensibles que d'autres. Les captages AEP de ce secteur peuvent présenter des risques de pollution par les métaux (BRGM, 1994).
- Dans la région de Balagne-Filosorma, des mesures sur le ruisseau d'Ogliastrone ont montré qu'à l'aval immédiat de l'ancienne mine de Valecalle, il existe une concentration en **manganèse** 8 fois supérieure au seuil de potabilité toléré (414 µg/L). En conséquence, il s'agit bien d'une pollution, les concentrations en **manganèse** sont liées au complexe minier de l'Argentella-Vallecale ;
- La présence de **nickel** liée à un fond géochimique a été reconnue dans les eaux du massif du Cinto (BRGM, 1997c). Aucune concentration précise n'est cependant mentionnée dans ce rapport.
- On peut noter toutefois la présence de teneurs anormales en **manganèse** et en **fer** dans les eaux de la retenue de Codole alimentant entre autres, et pour partie, les villes de Calvi et de l'Île Rousse, avec des valeurs en **manganèse** de 280 µg/L et en **fer** de 240 µg/L (BRGM, 1997c).

Du point de vue de la qualité des eaux souterraines, les eaux du socle granitique sont très peu minéralisées et sont souvent exemptes de toute pression anthropique. En revanche, les eaux des alluvions sont de même nature que celles des granites mais avec parfois des teneurs anormalement élevées en **fer** et en **manganèse** lorsque le milieu est captif (Conchon *et al.*, 1984a).

Par exemple, au niveau de la vallée de l'Ortolo, sur le secteur de Roccapina, la composition chimique de eaux souterraines est marquée par des teneurs en **fer** et en **manganèse** de l'ordre de 2 mg/L, soit dix fois supérieure aux normes.

Les granites contiennent des filons de sulfures riches en éléments traces potentiellement dégradables par les eaux, si bien que les éléments les plus aptes à passer en solution dans les eaux peuvent donner des concentrations élevées.

Par exemple, dans la vallée du Prunelli, à proximité d'Ajaccio, les eaux des granites ont parfois des concentrations en **fluor** plus importantes que la moyenne, dues à la présence de filons de fluorine (Conchon *et al.*, 1984b).

Une étude de valorisation de l'inventaire géochimique portant sur les alluvions des cours d'eau a été réalisée par le BRGM (1997d) sur la Corse du Sud. Les résultats de cette étude, dont le but est de faire le lien entre le contexte géologique et les sols et la présence potentielle d'éléments traces dans les eaux, sont les suivants :

- Le **plomb** est généralement associé aux leucogranites. Il est également présent dans les zones de fractures des autres formations granitiques et rhyolitiques. Sa mise en solution dans les eaux de surface et souterraines est rendue difficile par ses caractéristiques physico-chimiques. Ainsi, il est peu probable de retrouver des concentrations significatives en plomb d'origine naturelle dans les eaux.
- Le **zinc** est présent dans les granites permien ainsi que dans les zones de contact entre les gneiss et les leucogranites. Il est possible d'avoir des teneurs importantes en zinc dans les eaux au niveau de ces secteurs.
- Le **cuivre** est typique des encaissements basiques comme les massifs gabbroïques. De même que pour le plomb, il est très peu probable de retrouver des teneurs naturelles significatives en cuivre dans les eaux.
- L'**arsenic** marque les zones de fracturations comme celles de l'extrême partie Sud du département ainsi que celles des formations rhyolitiques plus au Nord. A contrario du **plomb** et du **cuivre**, il est possible que les eaux de ces secteurs contiennent des concentrations en **arsenic** significatives de l'ordre de plusieurs micro grammes par litre.
- Le **cadmium** est présent dans les roches en association avec le **zinc**. En revanche sa présence dans les eaux à des teneurs dépassant 1 µg/L est très incertaine.

Enfin, il est à noter que le **cuivre** et l'**arsenic** sont présents dans les migmatites et les gneiss du secteur de Porto-Vecchio (BRGM, 1997d).

### ***Rapport entre la lithologie et les éléments traces***

En résumé sur les principales occurrences en éléments traces dans le secteur de la Corse granitique et volcanique, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 7). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptible de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Les teneurs élevées en éléments traces d'origine naturelle ou anthropique sont plutôt rares sur ce secteur même si localement le contexte géologique est riche en éléments traces. Si elles existent, elles concernent surtout le **fer** et le **manganèse** des zones gneissiques.

Les très fortes teneurs rencontrées sont à mettre en relation avec les apports d'anciennes activités minières.

Enfin, les contaminations des eaux dans le domaine granitique intéressent les eaux provenant des alluvions du socle. Des concentrations élevées en **fer** et **manganèse** peuvent toutefois être décelées au sein de tous les réservoirs si les conditions du milieu sont réductrices (Rossi *et al.*, 2001).

Encaissant	Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
Granites	Ag Ba Cu F Fe Pb Zn	Ba F Fe
Gneiss	Fe Mn	Fe Mn
Gabbro-diorites	Cu	
Syénites	Fe	Fe
Rhyolites	Cu Pb Zn	
Tufs volcaniques	Cu Pb Zn	
Grauwackes	Pb Zn	Zn
Bassin houiller	Fe	Fe

Tableau 7 : Relation entre lithologie et éléments traces pour la Corse granitique et volcanique

### 3.8. LA COUVERTURE LANGUEDOCIENNE

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Exclusivement sédimentaire, la couverture languedocienne est constituée de formations détritiques et carbonatées dont les plus anciennes datent de la fin de l'ère primaire (bassin permien de Lodève). Cette couverture, peu déformée, est discordante sur le socle hercynien de la bordure Est et Sud-Est du Massif Central ainsi que sur le socle de la Montagne Noire (Figure 22).

Géographiquement, ce secteur correspond au territoire qui s'étend approximativement, de la rive droite de vallée du Rhône à l'Est à l'aval de Valence jusqu'aux premiers reliefs des Corbières et du massif du Mouthoumet à l'avant des Pyrénées entre le sud du Massif central et les plaines littorales. Ce territoire couvre la partie sédimentaire des bassins versants des basses vallées de l'Aude, de l'Orb, de l'Hérault, du Gardon, de l'Ardèche et du Rhône rive droite.

Géologiquement, les premiers terrains discordants sur le socle au Nord varient selon les secteurs. Au niveau de la bordure du Massif Central et des Cévennes au Nord et à l'Est, ce sont les formations triasiques et jurassiques qui constituent la base des dépôts alors que plus à l'Ouest au contact de la Montagne Noire, on retrouve des grès permians (bassin de Lodève), et des sédiments tertiaires qui bordent le socle.

La limite entre les Pyrénées et ce secteur est représentée par un grand chevauchement : le Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen. La limite Est, est calée sur le Rhône et au niveau de son delta par une fracture majeure : la faille de Nîmes.

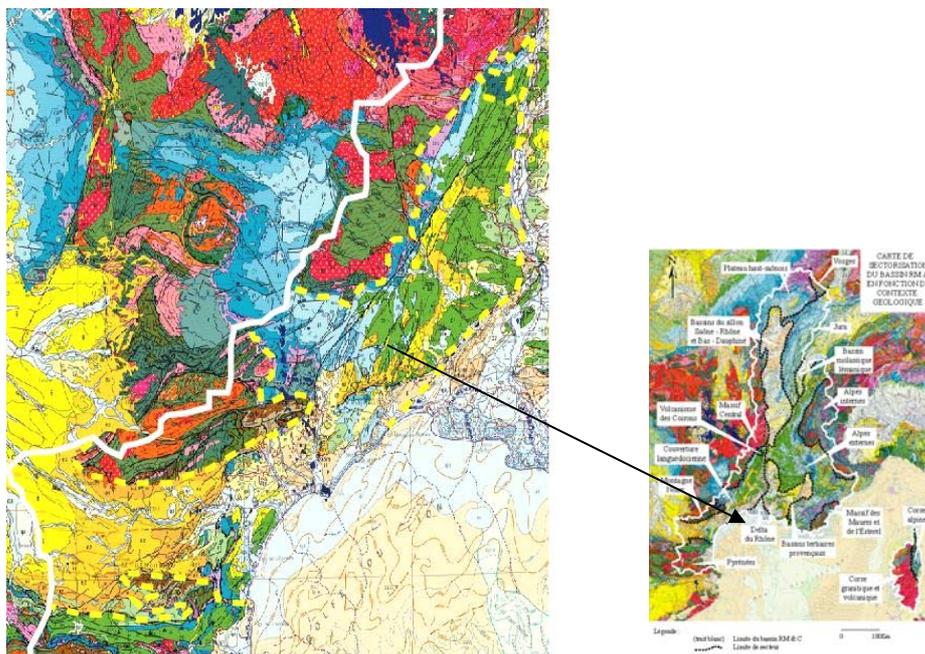


Figure 18 : Carte géologique de la couverture languedocienne (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

## Les principales occurrences en éléments traces

### Le Permien

Le Permien au niveau de la couverture languedocienne ne concerne que le bassin de Lodève. Une étude réalisée par Beaucaire (1987) a montré qu'il existe des concentrations naturelles en **fer**, en **manganèse** et en **baryum** dans les eaux souterraines du bassin de Lodève. Les ordres de grandeurs sont les suivants : 550 µg/L de **fer**, 110 µg/L de **manganèse** et jusqu'à 2 mg/L de **baryum**. Ces occurrences sont également citées par Elbouch (1996) qui mesure jusqu'à 151 µg/L de **manganèse** dans certains points de prélèvements en eaux souterraines du bassin de Lodève. La présence de matière organique dans ces sites pourrait expliquer ces teneurs. Dans les autres points du bassin, les concentrations varient généralement de 10 à 25 µg/L. Dans les eaux de la Lergue, drainant le bassin de Lodève, la teneur en **manganèse** reste faible (<5 µg/L). Les analyses réalisées par Elbouch (1996) montrent également la présence de **bore** dans les eaux (de 17,5 à 1032 µg/L). Dans les eaux souterraines, les plus fortes valeurs se situent dans deux forages situés entre Le Puech et le Mas d'Alary. Les valeurs atteignent environ 400 µg/L dans le premier forage (4 mètres de profondeur) et 1032 µg/L dans le second (40 mètres de profondeur). Dans les eaux superficielles, les teneurs sont généralement plus basses bien que significatives à proximité de la mine du Mas d'Alary : environ 500 µg/L en amont du Riviéral et en aval du Rivernoux avant la confluence avec la Lergue. Dans cette dernière les concentrations s'échelonnent de 50 à 200 µg/L. Enfin, Elbouch a également noté la présence de **baryum** d'origine naturelle dans les eaux souterraines et dans les cours d'eau du bassin permien de Lodève. Dans les eaux souterraines, des

concentrations de 60 à 150 µg/L ont été relevées. Dans plusieurs affluents de la Lergue, l'auteur signale des teneurs comprises entre 50 et 200 µg/L qu'il attribue à une origine géologique (présence de barytine et/ou d'uranium). Dans les cours d'eau, les valeurs les plus élevées ont été mesurées en aval de la mine dans le Riviéral et le Rivernoux (250 à 400 µg/L). D'après Elbouch, ces valeurs sont liées aux activités d'extraction du radium du minerai à partir de la coprécipitation avec le chlorure de **baryum**.

D'autres métaux sont présents dans ce même bassin. L'**arsenic** est ainsi retrouvé aussi bien dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines. L'origine anthropique est démontrée par l'apport de pesticides : le pénarsol. Par exemple, des concentrations de l'ordre de 400 µg/L d'**arsenic** ont été mesurées dans les eaux souterraines du forage de Brière situé dans les pélites et les argiles rouges du Saxonien. Le pénarsol n'est toutefois pas le seul responsable des fortes teneurs en **arsenic** présentes dans les eaux. L'existence de filons d'hydroxydes de **fer** riches en **arsenic** recoupant les formations du Permien participe à l'augmentation des concentrations. L'origine de cette occurrence est donc mixte, avec toutefois un apport plus important par le pénarsol (JP Marchal, BRGM, communication personnelle).

Une étude sur le fond géochimique naturel en **arsenic** a été réalisée sur le bassin de Lodève (JP Marchal, BRGM, communication personnelle). Des mesures, sur des eaux de ruisseaux dont les apports anthropiques en **arsenic** sont nuls, donnent un fond moyen de l'ordre de 20 µg/L d'**arsenic**. Les cours d'eau concernés sont les suivants : ruisseau de Rabejac, Roubieu, Murette ainsi que le lac du Salagou.

## Le Trias

Le Trias de la couverture languedocienne est, d'une manière générale, le premier niveau géologique recouvrant le socle hercynien de la bordure Sud-Est du Massif Central. Il est composé de terrains sédimentaires variés (calcaires, marnes, gypses, grès...) avec une prédominance de niveaux salifères. Cet ensemble triasique est connu pour ses minéralisations métallifères exploitées (filoniennes et stratiformes) mais également pour sa médiocre qualité en eau liée aux sulfates (Berger *et al.*, 1978). En effet, il existe des problèmes de teneurs en sel et en métaux anormalement élevées aussi bien dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines.

Sur le département de l'Ardèche, une étude de valorisation de l'inventaire géochimique a été réalisée par Artignan *et al.* (1995b). Les résultats pour les éléments traces dans les sols sont les suivants :

Pour le **cuivre**, il se trouve sous forme oxydée dans les grès triasiques et il est peu mobilisable par les eaux.

Le **plomb** est présent sous forme de sulfures (galène) dans les mêmes grès et il est relativement peu mobile dans l'eau et donne des concentrations au maximum de l'ordre de quelques µg/L.

En ce qui concerne l'**argent**, l'**antimoine** et le **cadmium**, ils se retrouvent souvent le long des grands accidents tectoniques séparant les formations secondaires et les granites. Ils sont peu solubles, mais ils peuvent passer en solution s'ils sont associés

au **fer** et au **manganèse**. Ce cas existe au Sud du département. L'**antimoine** est relativement plus présent dans les dolomies sur le secteur de Charmes-sur-Rhône (Benkö *et al.*, 1977 ; Samana, 1970). Il peut donner des concentrations significatives, comme le montre le rapport de Barbier *et al.* (1999) où deux forages en Ardèche ont présentés des concentrations de 60 et de 25 µg/L d'**antimoine**.

Le **chrome** est totalement absent dans la couverture triasique et le **baryum** est en général peu mobilisé dans les eaux.

Le **zinc** est naturellement associé au Trias et à la base du Jurassique, il est le plus souvent sous forme de sulfures (blende) facilement oxydables, donc mobilisables, et ce d'autant plus qu'il est associé au **fer** et au **manganèse** (Artignan *et al.*, 1995b). Dans les grès et les dolomies, des concentrations atteignant 300 µg/L ont été mesurées sur des puits et sources (Barbier *et al.*, 1999). Pour le zinc, une relation entre les concentrations dans l'eau et les teneurs dans les sols a été mise en évidence.

Dans les zones riches en **zinc** (sols à teneurs supérieures à 800 ppm), les puits ou les sources présentent des concentrations dans les eaux de 50 à 300 µg/L. Au contraire dans les secteurs pauvres en **zinc**, les valeurs mesurées sont inférieures à 5 µg/L. Le **zinc** est entre autres un marqueur du Trias et de la base du Jurassique.

Globalement, dans le secteur de l'Ardèche et du Gard, de nombreux filons riches en sulfures métalliques recoupent la base de la couverture sans toutefois dépasser les marnes toarciennes (Boulandon, 1977). Ces filons contiennent des minéraux tels que la galène, la blende, la pyrite, la barytine et la stibine. Autrement dit, les éléments susceptibles d'être mis en solution dans les eaux, si les conditions sont optimales, sont le **plomb**, le **zinc**, le **fer**, le **baryum**, l'**antimoine** et l'**argent** (Alabouvette *et al.*, 1988 ; Berger *et al.*, 1988 ; Fogliérini *et al.*, 1980a et 1980b).

Les activités minières exploitant ces minéralisations en métaux dans les roches du Trias sont source de pollution pour les eaux après arrêt des exploitation par débordement des réservoirs constitués. L'exemple le plus fréquent est celui de la pollution en **fer** et en **zinc** liée à l'oxydation des sulfures. D'autres métaux sont aussi concernés mais dans une moindre mesure. Il s'agit de l'**arsenic**, du **plomb** et plus rarement du **cadmium** (Suais *et al.*, 1990 ; Laille-Timsit, 1989).

A noter que malgré la mise en œuvre de station de traitement des eaux d'exhaure pour certains sites, certains cours d'eau demeurent contaminés (comme la Ligne à l'aval des mines de Largentière en Ardèche - étude Conseil général Ardèche, 2001).

## Le Jurassique et le Crétacé

Les niveaux dolomitiques de l'Hettangien et du Lotharingien sur le secteur de du Caylar sont géochimiquement anomaux car ils présentent une imprégnation riche en galène et en blende (Boulandon, 1977; Alabouvette *et al.*, 1987).

La base du Toarcien présente des minéralisations en **plomb** et en **zinc** que l'on peut suivre géographiquement sur toute la bordure du Massif Central depuis Cessenon (Fuchs, 1976).

La mise en solution du **zinc** dans les eaux des niveaux géologiques du Lias est très probable.

Pour les niveaux du Jurassique supérieur, le plateau karstique de Saint-Martin-de-Londres (34) est riche en cavités souterraines. Ces vides, dans les calcaires du Malm, sont parfois remplis d'argiles contenant des éléments métalliques comme par exemple le **fer** et l'**aluminium** (Philip *et al.*, 1978). Dans ce secteur, Pane-Escribe (1995, 1997) a étudié les éléments traces dans les eaux du causse de l'Hortus et montre la présence de **cuivre** dans certains forages. La présence de cet élément dans des gammes de concentrations de 2-3 µg/L est due au lessivage des placages argileux dans les fissures. En période de traitement des vignes, ces teneurs sont influencées par les activités humaines et peuvent atteindre 17 µg/L. L'utilisation de méthodes analytiques fines (ICP-MS) a également permis à l'auteur de mettre en évidence la présence d'**arsenic**. Les teneurs sont faibles (< 1µg/L) mais trouvent une origine naturelle. On notera également la présence naturelle de **baryum** (jusqu'à 21 µg/L) et de **manganèse** avec une concentration maximale de 142 µg/L. La présence en teneurs significatives d'**arsenic** et de **manganèse**, dans la source du Crès en particulier, est liée aux conditions réductrices de la zone drainée (drainage probable des marnes paléocènes).

Les remplissages karstiques concernent aussi le Bathonien sud-cévenol, sur la zone de Saint-Bresson avec la présence d'argiles riches en **plomb** et en **zinc** (Le Guen *et al.*, 1989). La mobilisation de ces éléments sous forme particulière dans les eaux est possible, alors que la mise en solution sous forme de cations l'est moins.

## Le Tertiaire et le Quaternaire

En ce qui concerne les terrains tertiaires, il existe très peu de problèmes de contaminations en métaux dans les eaux souterraines. S'ils sont présents, ils n'intéressent que les éléments comme le **fer** et le **manganèse**. Un exemple est celui du secteur du val de l'Aude où l'Eocène renferme des niveaux ligneux donc riches en **fer**, qui altèrent la qualité des eaux souterraines (Berger *et al.*, 1993).

Au niveau du bassin versant de l'Hérault, la principale source de **plomb** dans les eaux provient de la mine des Malines. Les essences et les fumées des industries constituent une autre source importante de plomb d'origine anthropique. Les teneurs dans les eaux de surface à l'exutoire du bassin versant de l'Hérault sont cependant très faibles, de l'ordre de 0.2 µg/L. (Petelet *et al.*, 2004; Petelet, 1998).

Des mesures en **cadmium** dans les eaux de l'Hérault ont été réalisées par Petelet (1998). Elles ne dépassent pas 0.01 µg/L en contexte géologique carbonaté, alors qu'en tête du bassin versant (contexte géologique associé aux schistes des Cévennes) elles sont proches de 0.1 µg/L.

Dans l'Orbiel, au nord de Carcassonne, les campagnes de mesures réalisées par l'AERM&C ont montré la présence constante d'**arsenic** dans les bryophytes (de 20 à 160 µg/g) et les sédiments (42 à 540 µg/g). L'origine de cet élément peut être relié au contexte de la partie amont du bassin versant. Dans ce secteur de la Montagne Noire, la présence d'un fond géochimique naturel élevé en arsenic a été reconnue (cf. § 3.12), mais ce fond est très largement accentué par les activités minières (mines de Salsignes).

Enfin, l'activité agricole et viticole est un facteur de contamination anthropique en éléments traces dans les eaux. Par exemple, La Thongue présente des teneurs élevées en **cuivre** qui s'expliquent par le traitement des vignes (JP Marchal, BRGM, communication personnelle).

### ***Rapport entre la lithologie et les éléments traces***

Pour résumer les principales occurrences en éléments traces dans le secteur de la couverture languedocienne, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 8). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Encaissant			Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines	
Permien	Bassin de Lodève	Grès, conglomérats et arkoses	As Ba Cu Fe Mn	Ba As Fe Mn	
Trias	Trias inférieur	Grès, conglomérats et arkoses	Ba Cu F Fe Pb Zn	Ba F Fe Pb Zn	
		Dolomies (Muschelkalk)	As Ba F Fe Pb Sb Zn	As Ba F Fe Zn	
	Trias supérieur	Argiles et quelques bancs de grès et de dolomies	Ba F Fe Pb Zn	Ba F Fe Zn	
Jurassique	Lias	Hettangien	Dolomies	Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Sinemurien	Marno-dolomitique	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Lotharingien	Marno-dolomitique puis calcarénitique	Ba Cu Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Carixien	Niveaux dolomitiques dans les calcaires à entroques	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
	Dogger	Bajocien	Niveaux dolomitiques dans les calcaires à entroques	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
		Bathonien	Dolomies	Pb Zn (Cd plus rare)	Zn
		Oxfordien	Marnes	F	F
	Malm	Kimméridgien	Dolomies	Ba Fe Pb Zn	Ba Fe Zn
			Calcaires et bauxites	Fe Al	Fe
	Filons de sulfures dans la couverture au niveau de la bordure Sud-Est du Massif Central (du Trias au Toarcien)			Ag As Ba F Fe Pb Sb Zn	As Ba F Fe Zn
Remplissages karstiques dans les formations du Trias et du Jurassique			Ba Fe Pb Zn (Sb plus rare)	Ba Fe Zn	
Tertiaire	Eocène	Niveaux ligniteux	Fe	Fe	

Tableau 8 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la couverture languedocienne.

### Conclusion sur le fond géochimique

Les secteurs les plus à risque de fortes concentrations en éléments traces dans les eaux sont globalement les formations sédimentaires les plus anciennes (Permien et Trias) car elles sont le plus souvent recoupées par des filons de sulfures métalliques facilement oxydables et elles sont composées par des matériaux issus de l'érosion du socle.

Les recherches bibliographiques ont montré que le Saxonien du bassin de Lodève est très riche en **arsenic**, **fer**, **manganèse** et **baryum**. Le fond géochimique naturel dans les eaux de surface et les eaux souterraines est relativement fort comme par exemple dans le secteur du lac de Salagou où l'**arsenic** se situe autour de 20 µg/L.

Le Trias bordant le socle centralien contient de nombreux métaux (filons sulfurés, minéralisations stratiformes) et nécessite donc qu'une attention particulière soit portée à la qualité de ces eaux. Il semblerait que les niveaux dolomitiques soient plus sensibles du point de vue contamination naturelle en métaux que les autres niveaux.

Il faut également noter que sur certains cours d'eau les activités minières passées contribuent encore à l'enrichissement des eaux de certains cours d'eau en éléments métalliques.

Enfin, en ce qui concerne les formations sédimentaires plus récentes, les problèmes, s'ils existent, sont simplement localisés et donc ne sont pas transposables sur l'ensemble du domaine languedocien. Les milieux franchement carbonatés jouent le rôle de tampon et empêchent les métaux de passer en solution dans les eaux. Le **plomb**, le **chrome** et le **nickel** n'ont montré en Ardèche que des valeurs dans les eaux inférieures à 1 µg/L.

### 3.9. LE DELTA DU RHONE

#### *Rappel sur le contexte géologique*

Le delta du Rhône est, géographiquement, représenté par la Camargue. Cette vaste plaine, de plusieurs dizaines de kilomètres de large, est constituée de formations détritiques quaternaires (conglomérats et cailloutis, sables, argiles...), apportés par le Rhône et la Durance et accumulés sur des épaisseurs très importantes dans ce bassin à forte subsidence (Figure 19).

L'activité agricole et industrielle est beaucoup moins prononcée que plus au Nord dans le couloir rhodanien à proprement parler. Ceci est dû à la présence de nombreuses zones marécageuses et d'étangs recouvrant des surfaces de plus en plus grandes lorsque l'on se rapproche de la mer, et du cœur du Parc Naturel Régional de Camargue.

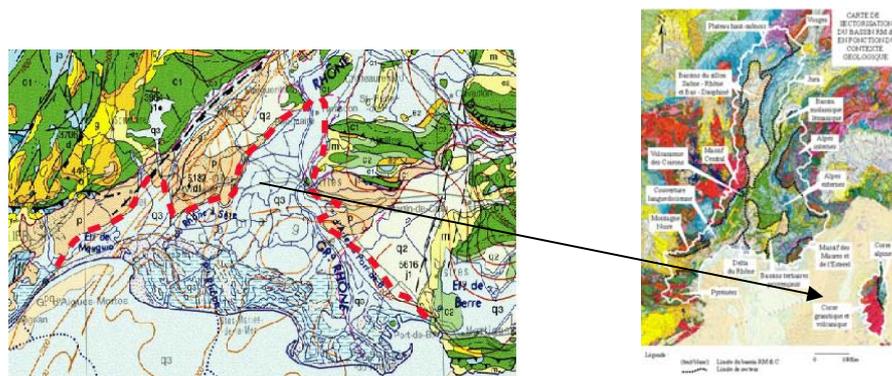


Figure 19 : Carte géologique du delta du Rhône (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### ***Les principales occurrences en éléments traces***

Dans le secteur de Beaucaire à l'amont, l'aquifère alluvial est caractérisé par des recouvrements importants de limons argileux, les eaux sont parquées par un déficit en oxygène et par la présence de **manganèse** et de **fer** en solution.

Les eaux du Rhône, ainsi que celles de la mer Méditerranée à proximité des terres, contiennent de nombreux métaux (**cadmium, plomb, arsenic, zinc...**) sous forme dissoute ou sous forme particulaire. Une vaste gamme d'éléments traces sont présents sur ce secteur à des concentrations plus ou moins importantes ; l'origine de ces éléments est anthropique (Grousset *et al.*, 1995 ; Elbaz-Poulichet *et al.*, 1996).

La pollution atmosphérique joue également un rôle important dans la contamination des eaux. Par exemple, sur le secteur de la nappe de La Crau, à l'Est d'Arles, en 1985, les quelques occurrences identifiées en **plomb** (jusqu'à 30 µg/L) et en **cadmium** (maximum de 0.5 µg/L) avaient été mises en relation avec les eaux polluées des pluies ou de l'irrigation (BRGM, 1985). Les auteurs de ce rapport notaient cependant que les concentrations mesurées dans les eaux souterraines étaient bien inférieures aux concentrations relevées dans les pluies (jusqu'à 7.7 µg/L de cadmium, 26 µg/L de plomb et 1.7 µg/L de mercure) et les canaux d'irrigation. Ces métaux ont vraisemblablement été adsorbés au niveau de l'aquifère. Cette fonction d'épuration est particulièrement efficace dans les zones de circulation lente. La baisse des teneurs est également liée à une dilution par les surplus d'irrigation.

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Les éléments métalliques retrouvés en solution dans les eaux de surface et souterraines du delta du Rhône ont probablement une origine anthropique, sauf en ce qui concerne le **fer** et le **manganèse** qui sont présents dans les sédiments détritiques sous forme d'oxydes et qui passent dans les eaux lorsque le milieu devient réducteur.

## **3.10. LE JURA**

### ***Rappel sur le contexte géologique***

Le massif du Jura est considéré comme un des premiers reliefs de la chaîne alpine car son histoire géologique est liée à celle des Alpes. Ce massif forme un arc et s'étend de la ville de Bâle en Suisse jusqu'à la région de Crémieu (Figure 20).

Les terrains rencontrés sont sédimentaires, hormis le petit lambeau de socle hercynien de la Serre. A l'Ouest, les premiers niveaux géologiques affleurants sont ceux du Trias sous-jacents.

Le Jura est un massif qui peut se subdiviser en deux parties. Le Jura tabulaire situé au Nord-Est constitue une première partie. Il correspond à la région des plateaux (plateau d'Ornans, de Lons-le-Saunier, de Champagnole...), avec une structure de couches

subhorizontales. Le deuxième ensemble est celui du Jura plissé, à l'Ouest, avec une succession d'anticlinaux et de synclinaux.

Le Jura est aussi un grand domaine karstique, avec de très nombreuses formes de dissolution (lapiez, dolines, ouvalas...), galeries souterraines et résurgences (sources du Lison, de la Loue..) si bien que les ressources en eaux souterraines des aquifères karstiques peuvent être très vulnérables aux pollutions anthropiques.

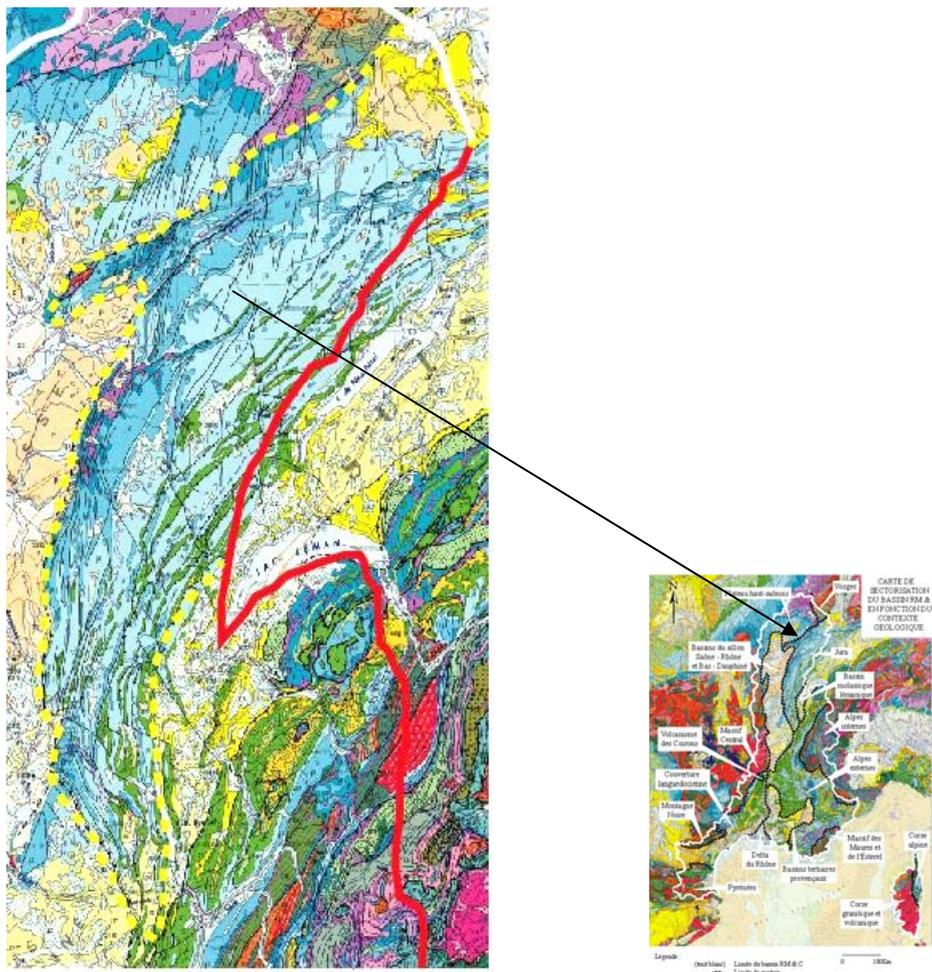


Figure 20 : Carte géologique du Jura (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### **Les principales occurrences en éléments traces**

Peu de références pertinentes sur la présence d'éléments traces dans les eaux du Jura ont été trouvées et les quelques documents consultés traitent le plus souvent de la présence de ces éléments dans les roches et non dans les eaux. Cependant,

d'après les connaissances sur les relations entre la géologie et le fond géochimique naturel des eaux, et des eaux souterraines en particulier (BRGM, 2005), les occurrences sont probablement peu nombreuses. Le contexte karstique du secteur, avec ses calcaires massifs et ses vitesses de circulation rapides, n'est pas favorable à la présence d'éléments mineurs dans les eaux. Toutefois, dans certaines zones particulières (interface avec le Trias, présence d'argiles, confinement, ...), des occurrences naturelles ne sont pas à exclure.

### Le Trias

Les eaux souterraines du Trias sont très minéralisées car elles sont issues des formations gypseuses. La présence naturelle de métaux en solution dans ces eaux à des fortes concentrations n'est pas à exclure.

### Le Jurassique et le Crétacé

Les formations sédimentaires du Jurassique et du Crétacé du massif du Jura sont franchement marines par rapport au Trias si bien que la présence naturelle de métaux dans de tels niveaux est rare.

Cependant, il existe des formations riches en **fer** qui, autrefois, ont été exploitées comme à Calmoutier dans les calcaires bioclastiques ferrugineux de l'Aalénien, ou encore à Ougney (BRGM, 1995b). La mise en solution du **fer** dans les eaux au contact de ces calcaires n'est toutefois pas identifiée dans la littérature.

Les travaux de Dematteis (1995) sur la typologie géochimique des aquifères carbonatés nous donnent quelques indications sur la présence de **fer** dans les eaux souterraines de ce secteur. Sur les 11 points de prélèvements qui lui ont servi à caractériser le Jura français, Dematteis relève la plus forte concentration en **fer** dans la source de Champdamoy (8.66 µg/L). L'auteur attribue cette valeur à l'oxydation des sulfures présents dans les calcaires oolithiques ferrugineux de la base du Bajocien.

Le **cadmium** est présent dans les calcaires du Malm, mais avec des concentrations trop faibles pour donner des teneurs significatives dans les eaux (Atteia *et al.*, 1995).

Du **chrome** a également été détecté dans les eaux souterraines par Dematteis (1995) qui relève une concentration de 1.6 µg/L dans la source de La Romaine. Cette dernière contient également du **manganèse** (7.5 µg/L), du **nickel** (4 µg/L) et de l'**aluminium** (12.2 µg/L). L'aquifère auquel sont liées ces concentrations est mixte, c'est-à-dire composé de roches carbonatées (calcaires du Bathonien) et de sédiments quaternaires.

Dans les eaux de surface, les références sont encore moins nombreuses. On pourra toutefois citer les travaux de Meybeck (1984) qui mesure 20 µg/L de **bore** dans les eaux courantes d'un bassin composé de marnes en Franche-Comté. Le bore est en effet souvent abondant dans les argiles marines. L'auteur note également que dans un bassin de lithologie équivalente mais influencé par les émissions d'un village, la teneur en bore atteint 80 µg/L. Les mesures réalisées par Meybeck portent également sur le **fluor** pour lequel il cite une valeur de 85.5 µg/L sur des marnes de France-Comté en forêt. Là encore, en présence de cultures, cette concentration atteint 247 µg/L.

### Le Tertiaire

Il existe des problèmes en **chrome** dans le secteur de la Chaud-de-Fond en Suisse dans les sols des molasses miocènes. Cette pollution est anthropique (agriculture) (Atteia *et al.*, 1995). Les vallées du haut Jura sont les secteurs les plus occupés par l'activité agricole et aussi les endroits où affleurent les molasses miocènes qui constituent les cœurs des synclinaux ; le phénomène suisse peut alors se transposer dans les autres vallées du Haut-Jura.

Le Tertiaire et plus particulièrement l'Eocène est l'époque de remplissages karstiques par des argiles (pisolithes de **fer**). Ils ont fait l'objet d'exploitation comme à Etupe dans la région de Montbéliard (Longet *et al.*, 2002). La présence de fer, dans les eaux souterraines en particulier, est donc possible dans ces niveaux.

### Le Quaternaire

La présence potentielle d'éléments traces d'origine naturelle dans les eaux souterraines des milieux alluvionnaires et glaciaires ou dans les cours d'eau associés sont globalement la même que dans les autres régions à savoir localement, une tendance à des fortes teneurs en **fer** et en **manganèse** lorsque les conditions du milieu deviennent réductrices.

Les exemples que l'on peut citer sont ceux de la vallée du Doubs en amont de Morteau (données AERM&C), et de la vallée de l'Ognon (Graillat, 1987 ; Mania *et al.*, 1988).

Les aquifères des vallées du massif du Jura sont soumis à la pollution. La zone la plus exposée est la vallée du Doubs en aval de Besançon et de Montbéliard. Du fait d'une occupation du sol importante par les activités industrielles et agricoles, le risque de pollution des eaux par les éléments traces existe. La présence de **chrome** et de **nickel** d'origine anthropique est ainsi rapportée par l'AERM&C (2004) dans le Doubs à l'aval de Morteau (jusqu'à 60 µg/g de chrome et 35 µg/g de nickel sur sédiments). Certains affluents du Doubs ou plus au Nord l'Allan et la Savoureuse aval sont également contaminés par les activités anthropiques (industrie automobile, activité horlogère). L'AERM&C relève ainsi 0.58 µg/g de **mercure** dans les bryophytes du Gland et des teneurs significatives en **arsenic**, **nickel** et **zinc** dans celles de l'Allan (20 µg/g d'arsenic, 276 µg/g de nickel et 683 µg/g de zinc).

D'autres exemples de pollutions anthropiques sont à noter :

- La région du Revermont (bordure du premier plateau jurassien) est une zone très viticole si bien que des problèmes en **cuivre** peuvent exister dans les eaux de surface.
- Une pollution anthropique au **cuivre** et au **nickel** est constatée dans les eaux de La Bienne entre Morez et Saint-Claude. Elle est liée à des activités industrielles (lunetterie).

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Le Jura est un secteur où la présence des éléments traces dans les eaux de surface et les eaux souterraines est le plus souvent d'origine anthropique et concerne surtout les vallées du Doubs, de la Loue et de l'Ognon.

La nature karstique des terrains du massif du Jura ne favorise pas la présence naturelle de ces éléments dans les eaux sauf localement pour le **fer** et le **manganèse**.

Néanmoins le Trias est un niveau géologique dont les formations gypseuses peuvent contribuer à la libération d'éléments traces dans les eaux souterraines et les cours d'eau éventuellement associés. Aucune information n'a cependant été trouvée sur ce sujet.

## **3.11. LE MASSIF CENTRAL**

### ***Rappel sur le contexte géologique***

La partie du Massif Central drainé vers la mer Méditerranée représente une surface mineure par rapport à l'ensemble du massif. Il s'agit de la bordure Est, Sud et Sud-Est du massif qui constitue une bande relativement étroite en périphérie de quelques kilomètres à dizaine de kilomètres de large (Figure 21).

Les faciès présents sont très variés, surtout du Morvan au Mont Pilat. Ce secteur comprend des gneiss, des granites et des schistes pour l'essentiel. Mais à cela, viennent s'ajouter les dépôts permo-carbonifères houillers du bassin de Blanzay, de Saint-Étienne, et d'Alès ou les séries volcano-sédimentaires de la Brévenne ainsi que des roches basiques comme les amphibolites.

Au niveau des Monts du Vivarais (département de l'Ardèche) en plus des formations de socle citées plus haut on rencontre localement, quelques lambeaux de terrains volcaniques.

Enfin, les Cévennes au Sud-Est se diffèrent du point de vue des faciès par rapport à l'ensemble du secteur car ce sont les schistes et les micaschistes qui dominent.

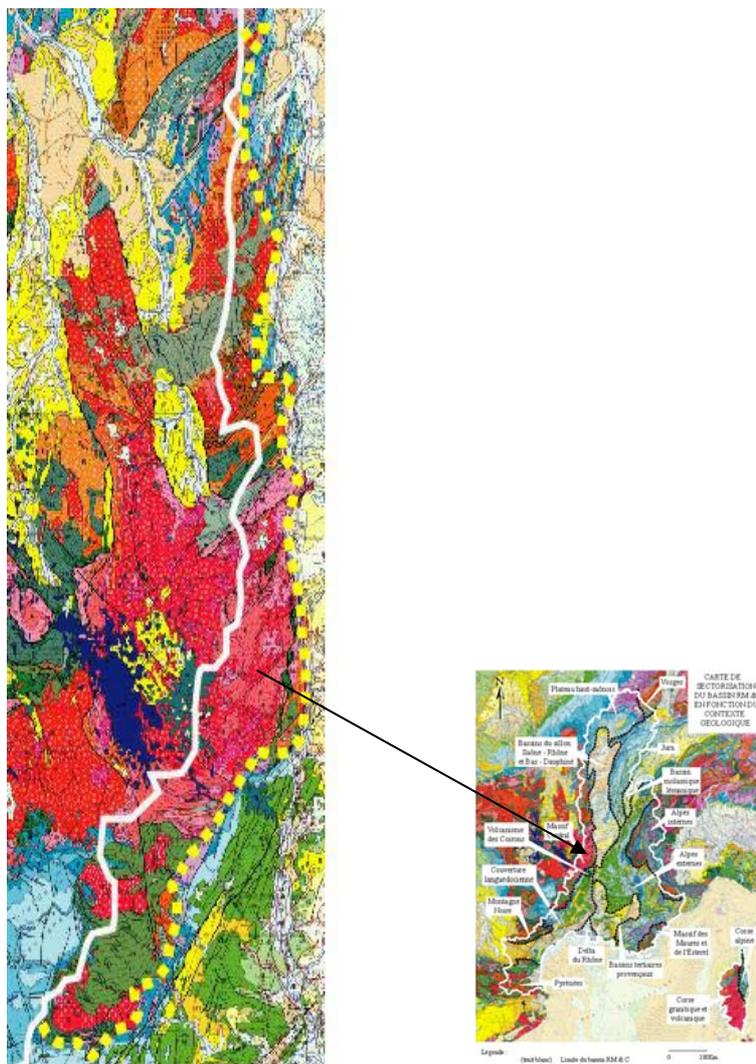


Figure 21 : Carte géologique du Massif Central (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

## Les principales occurrences en éléments traces

### • Départements du Rhône et de la Saône-et-Loire

Une étude de valorisation de l'inventaire géochimique national portant sur les sols et les alluvions a été réalisée par le BRGM (1997b) sur le département du Rhône. Cette étude, dont le but est de faire le lien entre le contexte géologique, les sols et la présence potentielle d'éléments traces dans les eaux, a montré que :

- Le **plomb**, le **zinc**, le **cuivre** et l'**arsenic** anciennement exploités se retrouvent dans les roches sous forme de filons en fortes teneurs le long des accidents de la bordure orientale du socle (Saint-Bel, Chessy...).

- Les formations carbonifères et certaines intrusions granitiques au Nord du département présentent un fond en **baryum** relativement élevé (700 à 900 ppm).
- Le **fer**, le **manganèse**, le **chrome** et le **nickel** sont plus abondants dans les amphibolites et le volcano-sédimentaire paléozoïque de la Brévenne que dans les granitoïdes et les migmatites.
- Le **fluor** est caractéristique des milieux granitiques et certaines parties des migmatites.

En ce qui concerne les départements du Rhône et de la Saône-et-Loire, c'est dans les formations volcano-sédimentaires de la série de La Brévenne, où la quantité et la diversité des éléments traces sont importantes, que l'on peut s'attendre à trouver à rencontrer des éléments mineurs dans les eaux. Ces formations ont d'ailleurs fait l'objet d'exploitations comme à Chessy où ont été extraits du **plomb**, du **zinc**, du **cuivre** et du **baryum** (Marcoux *et al.*, 1990). A Pampailly c'est l'**argent** qui a été exploité (Deroin *et al.*, 1992). On notera enfin que le **fer**, l'**antimoine** et l'**arsenic** sont également présents dans les sols (Delfour *et al.*, 1989 ; Sider *et al.*, 1988).

Malgré le manque de références sur les occurrences en éléments traces dans les eaux du secteur du Massif Central, il est possible au regard de ces informations sur la composition des roches et des sols, de prévoir les éléments potentiellement présents dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Il s'agit du **baryum**, du **fluor**, du **fer**, du **manganèse** et probablement aussi de l'**arsenic** et du **nickel**.

#### • Département de la Loire

Une étude similaire a été réalisée sur le département de la Loire par Artignan *et al.* (1995a). Elle a montré que :

- Les teneurs en **arsenic** atteignent 3100 ppm dans les sols, avec un fond géochimique moyen de l'ordre de 48 ppm. L'**arsenic** est assez bien corrélé avec les zones riches en wolframite. Au Sud de Saint-Chamond, il est en relation avec les zones à **antimoine**. Au Nord-Est il est clairement lié aux volcanites riches en mispickel, prolongement de la série de la Brévenne. Ce minéral est facilement altérable et donc l'**arsenic** est facilement mobilisable dans les eaux.
- Les teneurs en **cuivre** peuvent dépasser 1800 ppm, mais la concentration moyenne n'est que de 22 ppm. Le **cuivre** est nettement présent dans les formations volcaniques et, dans une moindre mesure, dans les granites. Dans les volcanites, le **cuivre** est potentiellement mobilisable dans les eaux par oxydation, en particulier si le **fer** et le **manganèse** lui sont associés.
- Les teneurs en **plomb** dans les sols peuvent atteindre 14000 ppm. Il est peu soluble, donc peu mobilisable dans les eaux, et il est principalement situé dans les volcanites. On le retrouve aussi à l'extrême Sud (Sud du Mont Pilat), associé à des filons dans des granites.

- Les teneurs en **argent** varient de 0.1 à 259 ppm, mais la concentration moyenne n'est que de 0.6 ppm. L'**argent** est surtout présent dans les volcanites. Notons quelques points isolés dans le Stéphanien. L'**argent** est très peu soluble dans les eaux.
- L'**antimoine** est associé à l'**argent** dans les volcanites. Il est mobilisé dans les eaux par oxydation, si bien qu'il est possible de trouver quelques traces d'**antimoine** naturel dans les eaux.
- Le **fer** se retrouve surtout en grande quantité dans le bassin stéphanien, mais sa présence est possible dans une vaste gamme de roches à des teneurs plus ou moins importantes. Sa contribution dans les eaux dépend des conditions de pH et de Eh du milieu dans lequel il se trouve.
- Pour le **manganèse**, les teneurs moyennes sont toujours très proches du seuil de détection. Souvent associé au **fer**, il peut être présent dans les terrains du bassin houiller stéphanois.
- Les concentrations en **chrome** varient entre 10 et 5000 ppm, avec une moyenne de 50 ppm. Le **chrome** se retrouve essentiellement dans le bassin stéphanien, mais il est peu mobilisable dans les eaux.
- Les teneurs en **baryum** peuvent atteindre 7900 ppm. Il semble marquer les formations granitiques sauf au Nord, où il apparaît dans les volcanites. Le **baryum** est potentiellement mobilisable dans les eaux peu sulfatées.
- Le **zinc**, souvent associé au **plomb**, se présente sous forme de sulfures (blende), facilement oxydable, donc mobilisables dans les eaux. Les concentrations varient entre 11 et 4280 ppm.
- Avec un maximum de 2700 ppm, et avec une moyenne de 25 ppm, le **nickel** a une image semblable à celle du **chrome**. Sa présence dans les eaux d'origine naturelle, à des fortes concentrations, n'est pas certaine sur ce secteur.
- Le **fluor** est présent sous forme d'apatite ou de fluorine, fréquentes et disséminées dans les granites. La fluorine est beaucoup plus soluble que l'apatite. Son niveau moyen de teneur est de l'ordre de 100 ppm.

En plus de ces informations sur le fond géochimique naturel des sols, il faut savoir que certains secteurs peuvent être influencés par des apports d'éléments traces d'origine anthropique comme le **fer** (anciennes exploitations). Sur le département de la Loire, il s'agit essentiellement de la vallée du Gier dans le bassin houiller stéphanois. La présence d'arsenic, de chrome, de nickel, de plomb et de zinc a d'ailleurs été relevée par l'AERM&C (2004) dans les eaux de ce cours d'eau.

### • Département de l'Ardèche

Une autre étude sur la valorisation de l'inventaire géochimique a été réalisée dans le département de l'Ardèche par Artignan *et al.* (1995b). Les observations sont les suivantes :

- Dans les zones riches en **zinc**, (sols à teneurs supérieures à 800 ppm), les puits ou sources présentent des concentrations dans les eaux de 50 à 300 µg/L. A l'inverse, dans les secteurs pauvres en **zinc**, les valeurs mesurées sont inférieures à 5 µg/L : il existe ainsi un lien entre les fortes teneurs dans le sol et dans les eaux.
- Les ensembles granitiques et gneissiques sont particulièrement riches en **baryum** (Chenevoy *et al.*, 1998). Pour le **baryum**, de fortes concentrations peuvent être rencontrées en présence de barytine à condition que les teneurs en sulfates ne soient pas trop grandes (<20 mg/L). En effet, en présence d'ions sulfates, le baryum tend à précipiter en barytine.
- Pour l'**arsenic** et l'**antimoine**, des cas de fortes concentrations, dans un contexte géologique schisteux, ont été constatées (forage du Vallon des Fabres ;111 µg/L d'**arsenic** et 83 µg/L d'**antimoine**). L'**antimoine** a un lien avec le **plomb**, il provient de l'oxydation de sulfoantimoniures de **plomb**. L'**arsenic**, dont le fond moyen est de 51 ppm, est lié à la destruction du mispickel, minéral facilement altérable. Ces fortes teneurs sont également à mettre en relation avec un fort temps de séjour des eaux souterraines.
- Dans les environnements granitiques, avec des eaux plus acides, le **plomb** peut se retrouver en solution en relation avec la destruction de l'orthophosphate de **plomb** (pyromorphite). Mais, globalement, une richesse de l'environnement en **plomb** ne paraît pas mettre en cause la qualité des eaux souterraines, sans doute en raison du rôle tampon joué par le carbonate de **plomb** (cérusite).
- Le fond géochimique en **fer** et en **manganèse** dans les eaux de surface et souterraines semble être faible. On les rencontre le plus fréquemment dans les ouvrages, puits ou forages, captant des niveaux situés sous la zone d'oxydation superficielle. Tout comme le **baryum**, la présence de **fer** marque les ensembles granitiques et gneissiques (Chenevoy *et al.*, 1998).
- Les richesses supposées en Cr-Ni de l'environnement géologique, type volcanique, ne se manifestent guère dans la chimie des eaux (faible solubilité et faible extension des manifestations volcaniques).
- Le **cuivre**, dont le fond géochimique moyen est faible dans les sols (30 ppm), est présent dans les granites sous forme de sulfures qui s'altèrent facilement par oxydation. Il s'associe dans les horizons pédologiques avec les oxydes de **fer** et de **manganèse**. En conséquence, il est peu probable de le retrouver en solution dans les eaux.

- Le **chrome** est peu représenté. Les teneurs dans les sols varient entre 10 et 2730 ppm, avec une moyenne de 68 ppm. Cet élément est en général associé à des oxydes ou des silicates stables insolubles.
- Le **fluor** est présent surtout dans le granite à l'Ouest de Tournon sous forme de filons. Sa présence dans les eaux à des fortes concentrations est possible.

#### • Départements de la Lozère et du Gard

Au niveau de ces deux départements, la partie du socle du Massif Central appartenant au bassin RM & C correspond aux Cévennes. La présence de métaux dans les formations granitiques et schisteuses est connue. Il semble même que le domaine schisteux soit plus riche en métaux que les terrains granitiques. Cependant, le lien avec une éventuelle contamination des eaux par les éléments traces d'origine naturelle n'est pas défini.

Le socle des Cévennes est constitué essentiellement par une série de type flysch, appelée schistes des Cévennes, et incluant vraisemblablement une partie du Briovérien, le Cambrien et l'Ordovicien. Des batholites granodioritiques, se comportant comme des diapirs, ont percé et repoussé les schistes si bien que de nombreuses minéralisations en éléments traces se sont mises en place au contact entre granites et schistes (Boulandon, 1977).

Un exemple est celui de Vialas où, dans les schistes au contact des granites se trouvent des grands filons de **plomb, zinc, antimoine, argent, fer, cuivre, arsenic, cadmium et nickel** (Landel *et al.*, 1969).

Le domaine schisteux des Cévennes

La série schisto-gréseuse contient de très nombreuses minéralisations de sulfures de **plomb**. Petelet (1998) a mesuré des concentrations en **plomb** de l'ordre de 0.1 µg/L dans la partie amont des eaux de l'Hérault dans un environnement riche en **plomb**. En conséquence, il existe un fond géochimique naturel en **plomb** dans les eaux des schistes mais celui-ci reste très faible. Il en est de même pour le **cadmium** pour lequel Petelet (1998) observe des valeurs maximales de 0.8 µg/L en amont du bassin versant de l'Hérault. D'après l'auteur, l'origine du cadmium semble liée aux schistes de la région de Valleraugue où le cadmium pourrait être associé au zinc dans la blende (ZnSO<sub>4</sub>).

Il existe aussi d'autres éléments traces dans les schistes paléozoïques des Cévennes comme le **fer**, le **zinc**, l'**arsenic**, l'**argent**, le **cuivre** et l'**antimoine** sous forme de filons (Gèze *et al.*, 1986 ; Alabouvette *et al.*, 1988 ; Périchaud *et al.*, 1980). La présence de ces éléments en solution dans les eaux est probablement très faible pour le **cuivre** et l'**argent**.

## Le domaine granitique et gneissique des Cévennes

Les granites hercyniens des Cévennes renferment des filons de sulfures de **cuivre**, de **fer**, de **baryum**, de **plomb** et d'**argent** (Gèze *et al.*, 1986) alors que les gneiss du secteur Nord du massif contiennent des minéralisations en **arsenic**, **antimoine**, **plomb** et **baryum** (Berger *et al.*, 1988). Les éléments comme le **fer**, le **baryum** et l'**arsenic** sont potentiellement mobilisables dans les eaux et des teneurs élevées y sont possibles.

### ***Rapport entre la lithologie et les éléments traces***

Le tableau de synthèse suivant résume pour chaque domaine le lien entre le fond géochimique dans les eaux et les roches (Tableau 9). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

### ***Conclusion sur le fond géochimique***

Les occurrences en éléments traces dans les sols et dans les eaux du secteur du Massif Central sont très nombreuses et concernent globalement tous les contextes géologiques présents, avec une mention spéciale pour le domaine volcanique et sédimentaire de la série de la Brévenne.

La grande diversité de contextes géologiques rend difficile l'interprétation des données, surtout au Nord du Mont Pilat.

La plupart des références bibliographiques traite de la gîtologie mais quelques informations sur les occurrences naturelles en métaux dans les eaux existent et sont donc transposables sur d'autres secteurs.

Enfin, pour la pollution d'origine anthropique, elle est le plus souvent liée aux exhaures minières localement nombreuses et très riches en métaux. Les vallées industrialisées et les activités agricoles sont peu nombreuses sur ce secteur. On peut citer, toutefois, la vallée du Gier dans le bassin stéphanois, dont les eaux contiennent du **fer** en raison de la présence d'anciennes activités de sidérurgie.

Département	Encaissant		Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
69 et 71	Granites (secteur Tarare)		Ba F Fe Pb Zn (As et Sb plus rare)	Ba F Fe
	Granites (Secteur Romanèche)		Ba F Fe Pb Zn	Ba F Fe
	Gneiss (secteur Tarare)		Ba F Fe	Ba F Fe
	Microgranites filoniens (secteur Tarare)		As Pb Zn Sb	As
	Série de la Brévenne et du Beaujolais	Contact schistes-gneiss et cornéennes	Cu Fe Pb Zn	Fe Zn
		Volcano-sédimentaire (Dévonien)	Ba Cu Cr Fe Mn Ni Pb	Ba Fe (Mn, Ni et Pb incertains)
		Séricitoschistes	Fe Mn	Fe Mn
		Filons quartzeux dans les mylonites silicifiées	As Fe Sb	As Fe (Sb incertain)
		Dacites, rhyolites et tufs (Viséen)	Ag As Ba Cu F Pb Sb	As Ba F (Cu et Sb incertains)
		Grauwackes	Pb	Pb
Calschistes		Cu Fe Pb	Fe	
42	Granites		Ba F Fe Pb Zn	Ba F Fe
	Bassin stéphanien		Fe Cr	Fe
	Schistes, micaschistes		Pb Sb Zn	Zn
07	Granites		Ba F Fe Pb Zn	Ba F Fe
	Gneiss		Ag Ba Pb Zn	Ba
30 et 48	Cévennes	Couverture métamorphique (Briovérien, Cambrien, Ordovicien)	La majorité des éléments traces	As Fe (Ni Sb incertains)
		Granites	Ba Cu F Fe Pb Zn	Ba F Fe
		Gneiss	As Ba Fe Sb	As Ba Fe
		Mylonites	As Pb Zn Sb	As

Tableau 9 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur du Massif Central.

### 3.12. LA MONTAGNE NOIRE

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

La Montagne Noire est l'extrême partie Sud du socle hercynien appartenant au Massif Central (Figure 22).

La structure géologique de la Montagne Noire peut se résumer de la manière suivante : un noyau central granito-gneissique (la zone axiale) englobé par une couverture briovérienne puis primaire métamorphique et essentiellement schisto-gréseuse avec quelques niveaux de carbonates.

Les terrains rencontrés sont donc anciens et de nature différente.

Les carbonates primaires ont subi plusieurs phases d'émersion dont une à la fin de l'ère primaire. C'est ainsi que les phénomènes de karstification sont apparus. Les vides créés dans l'encaissant sont pour la plupart remplis de matériaux détritiques argilo-sableux potentiellement riches en métaux.

Enfin, la limite Sud de la Montagne Noire est représentée par le recouvrement en discordance de sédiments tertiaires et quaternaires de la vallée de l'Aude.

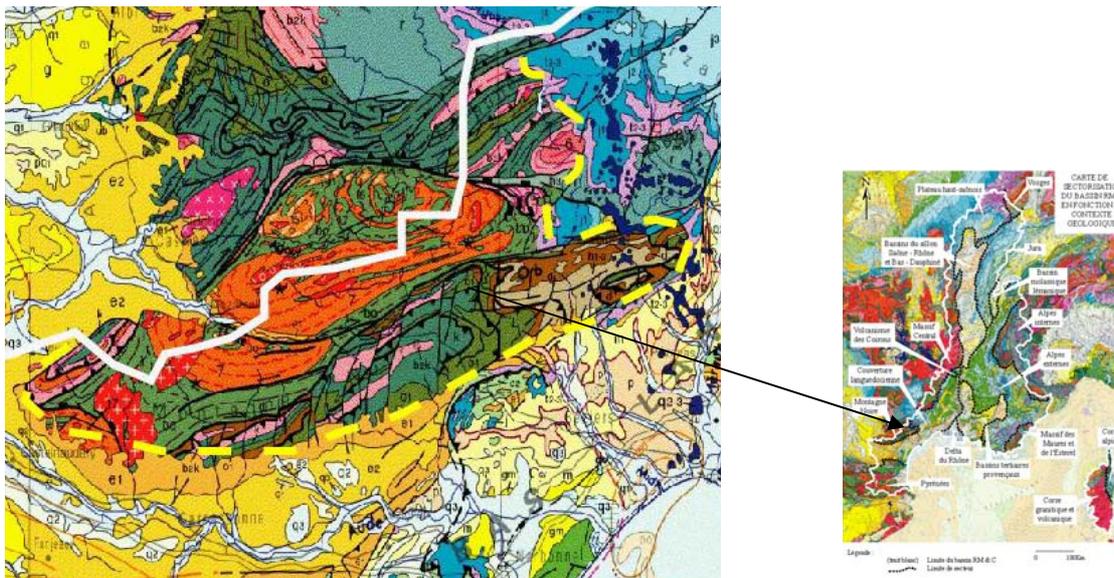


Figure 22 : Carte géologique de la Montagne Noire (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### Les principales occurrences en éléments traces

Michard (1990) a réalisé une synthèse géologique de la Montagne Noire. Un des objectifs de cette étude est d'actualiser les connaissances régionales dans les domaines de la recherche minière. Autrement dit, ce rapport fait le lien entre la présence d'éléments traces dans les sols et le contexte géologique local. En reprenant les caractéristiques physico-chimiques de chacun des éléments, il est possible d'émettre des hypothèses concernant le risque de fond géochimique élevé dans les eaux.

Les résultats de l'étude de Michard (1990), illustrant la partie propre au bassin RM & C, sont les suivants :

- Le **baryum** est essentiellement présent dans les faciès schisteux et/ou détritiques du Cambrien et du Silurien, ainsi que dans les shales noirs diantiens où il est associé au **cuivre** et au **manganèse**. Il est beaucoup moins présent dans les carbonates du Cambrien et du Dévono-Carbonifère (< 360 ppm). Pour le domaine

central, les granites, les gneiss ainsi que les schistes briovériens ont des faibles teneurs en **baryum** (< 500 ppm).

- Les fortes concentrations en **fluor** dans les roches correspondent, pour la plupart, aux faciès phosphatés de la série noire du Cambrien et à ceux du Dévono-Dinantien (> 1200 ppm). Il existe des teneurs importantes, mais moins fortes, en **fluor** dans les schistes verts du Cambrien.
- Des teneurs en **cuivre**, moyenne à fortes (> 95 ppm), sont liées aux shales noirs du Cambrien (association avec le **nickel**, le **chrome** et le **manganèse**), ainsi qu'à ceux du Dévono-Dinantien. On remarque également des fortes anomalies en **cuivre** dans les schistes du Briovérien où il est associé au **nickel** (faciès à pyrite).
- Le **manganèse** et le **fer** se concentrent essentiellement sur les principaux épisodes carbonatés de la couverture primaire (> 2150 ppm pour le **manganèse**) : calcaires et dolomies du Cambrien inférieur, calcaires dévono-dinantien (Tucker, 1974). La zone axiale cristalline est déficitaire en **manganèse**.
- Le **plomb**, le **zinc**, le **cadmium** et l'**argent** sont liés et de fortes anomalies (> 200 ppm pour le **zinc** et > 70 ppm pour le **plomb**) se superposent à la série noire argilo-phosphatée du Cambrien. Ces éléments se retrouvent également en grande quantité dans les minéralisations hercyniennes de type filonien (Boulandon, 1977 ; Crouzet *et al.*, 1980 ; Lepine *et al.*, 1988), ainsi que dans la zone axiale.

En ce qui concerne la présence naturelle d'éléments traces dans les eaux de la Montagne Noire, peu de références bibliographiques illustrent ce sujet. Elles traitent surtout des occurrences en métaux dans les eaux à l'aval des indices miniers. Néanmoins, pour les éléments les plus facilement mobilisables, le fond géochimique associé dans les eaux peut s'avérer important :

- Quelques sources dans le Cambrien présentent une forte concentration en **baryum** qui est à relier aux minéralisations de **baryum-plomb** des niveaux géologiques dont elles sont issues (La Lergue (environ 40 µg/L), La Boyne et la Dourbie (70 à 90 µg/L)). Elles drainent les dolomies dévoniennes karstifiées qui contiennent des dépôts de barytine dans les dépressions karstiques (Petelet, 1998).
- Le **cuivre** est aussi présent sous forme de minéralisations dans le Cambrien et dans les eaux mais à des teneurs très faibles qui montrent la mise en solution difficile du **cuivre** malgré un environnement géologique plutôt riche (Petelet, 1998). Une source cambrienne présente ainsi une teneur en **cuivre** d'environ 1µg/L. La présence de **cuivre** en fortes concentrations dans les eaux de surface est possible en cas de traitement des vignes (Michard, 1990).
- Certains cours d'eau ont des teneurs en **arsenic**, d'origine anthropique (activités minières), de plusieurs dizaines de µg/L, comme par exemple le Grésillou et l'Orb. Des mesures en amont des exhaures minières ont cependant montré des concentrations en **arsenic**, donc associables d'un fond géochimique naturel, de quelques µg/L au maximum (Rapports confidentiels).

### Rapport entre la lithologie et les éléments traces

En résumé sur les principales occurrences en éléments traces dans ce secteur, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 10). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Encaissant			Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines	
Couverture primaire métamorphique	Carbonifère		Schistes	Fe Cu	Fe
	Dévonien	Shales noires		Ba Cu F Fe Mn	Ba F Fe Mn
		Calcaires		Ni	Ni
	Silurien		Schistes	Cr	
	Ordovicien		Quartzites		
	Cambrien	k 4-6	Série schisto-gréseuse verte	Ba	Ba
		k 3	Schistes vets à paradoxides	Ba F	Ba F
		k 2b	Série schisto-grésocalcaires noire à nodules phosphates	Ag As Ba Cu Cr F Ni Pb Zn	As Ba F Ni Zn
		k 2a	Calcaires massifs et dolomies	Fe Mn	Fe Mn
		k 1c	Schistes du Layrac	Ba	Ba
k 1b		Tufs rhyolites	F	F	
	K 1a	Formation schisto-gréseuse	Ba	Ba	
Zone axiale cristalline	Anté-cambrien		Schistes X	Ag Cd Cr Cu Fe Ni Pb Sb Zn	Fe Ni Zn
	Orthogneiss			Pb Zn	Zn
	Granites hercyniens			Pb Zn	Zn
Filons de la zone axiale et de la couverture			Majorité des éléments traces	Les éléments mobilisables dans les eaux	

Tableau 10 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur de la Montagne Noire.

### Conclusion sur le fond géochimique

Les occurrences en éléments traces sur le secteur de la Montagne Noire sont nombreuses mais ne traitent principalement que de la gîtologie. Les formations les plus riches sont les terrains sédimentaires et métamorphiques de la couverture primaire, mais également les zones de failles.

Au niveau du noyau central granito-gneissique, les problèmes de minéralisation des eaux, s'ils existent, sont liés à la présence de filons de sulfures.

Pour la couverture briovérienne et primaire, une vaste gamme d'éléments traces sont présents sous forme de filons et de minéralisations stratiformes comme dans les shales noirs du Cambrien et du Dinantien.

Globalement, l'existence de fortes concentrations en métaux dans les eaux du socle de la Montagne Noire est localement très probable même si très peu de références bibliographiques mentionnent ce sujet.

### **3.13. LE PLATEAU HAUT-SAONNOIS ET LE MORVAN**

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Ce secteur est localisé dans l'extrême partie Nord-Ouest du bassin RM & C (Figure 23). Il s'étend du Beaujolais aux environs de Mâcon jusqu'au Sud du département de La Haute-Marne avec la partie amont du bassin versant de la Saône.

Géologiquement, les terrains composant ce secteur sont les formations sédimentaires du Trias et du Jurassique. Ils sont faiblement déformés au niveau du Morvan et tabulaires sur le plateau haut-saônois. De nombreuses failles normales y sont localisées surtout en bordure du fossé bressan, mais également au contact entre Trias et socle granitique.

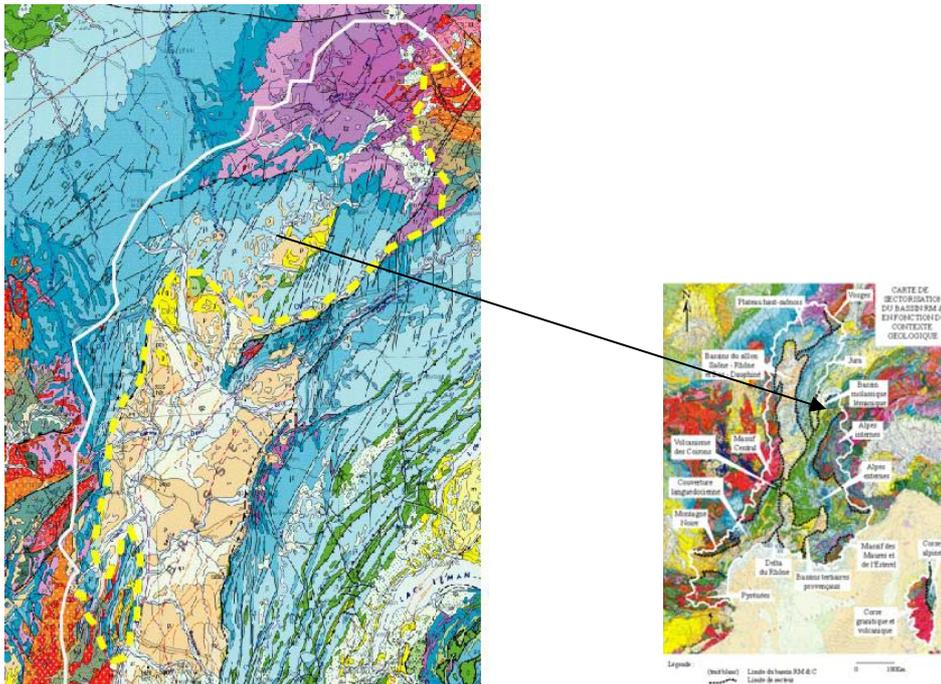


Figure 23 : Carte géologique du plateau haut-saônois et du Morvan (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### Les principales occurrences en éléments traces

Les occurrences en éléments traces sont peu nombreuses sur le secteur du plateau haut-saônois alors qu'au niveau du Morvan la présence d'éléments traces est plus connue, surtout dans les formations triasiques. Les quelques documents répertoriés traitent essentiellement du thème de la gîtologie, autrement dit uniquement des métaux dans les sols et non dans les eaux.

#### • Le Morvan

Les principales occurrences en métaux dans les eaux, sont les zones de contacts faillées entre le socle granitique et la couverture sédimentaire triasique, et entre le Trias et l'Oligocène bressan. En effet, les circulations des fluides dans les failles normales du Morvan génèrent des filons de sulfures de type dyke, mais également de type stratiforme par l'intermédiaire des joints de stratification (Chermette, 1975).

L'exemple le plus connu est celui de Romanèche, avec de nombreux amas manganésifères stratiformes dans les grès Rhétien et au contact avec le granite hercynien (Chermette, 1975).

Un autre exemple est celui des minéralisations stratiformes de **fluor** dans les grès du Trias dans le secteur d'Antully (Soule de Lafond *et al.*, 1980).

Ces deux éléments peuvent se retrouver assez facilement en solution dans les eaux souterraines.

Globalement, au niveau du Morvan, le Trias contient de nombreux sulfures dans ces niveaux les plus perméables. Le risque de contamination, surtout dans les eaux souterraines ayant un contact assez long avec ces formations, est probable et ne concerne que certains éléments comme le **fer**, le **manganèse**, le **baryum**, le **fluor**, le **zinc** et dans une moindre mesure le **cuivre** et le **plomb** (Arène *et al.*, 1977) ; mais également l'**arsenic** comme le montre le rapport de Jauffrey (2001), où des teneurs de plusieurs dizaines de µg/L ont été mesurées dans les eaux souterraines des grès triasiques au contact des granites.

Pour les formations sédimentaires plus récentes que celles du Trias, la présence de **fer** dans les carbonates du Jurassique est beaucoup plus rare car les faciès sont plus franchement marins. Localement, dans quelques niveaux, les faciès sont typiques de milieux marins de faible profondeur et peuvent contenir de nombreux oxydes de **fer** comme dans les calcaires oolithiques ferrugineux de l'Oxfordien, qui autrefois ont fait l'objet d'exploitations minières (Rémond *et al.*, 1984), les calcaires à entroques du Bajocien inférieur et de l'Aalénien (Coulon, 1979 ; De Blic *et al.*, 1972), les calcaires du Sinémurien (Baize, 1997).

Les apports anthropiques sont présents sur le Morvan par le traitement des vignes. Le Beaujolais ainsi que toute la côte du Morvan jusqu'à Dijon sont très occupés par l'activité viticole ; si bien que des fortes teneurs en **cuivre** sont connues dans les eaux de surface (Lorenchet-de-Monjamont *et al.*, 1973).

#### • Le plateau haut-saônois

La présence d'éléments traces au niveau du plateau haut-saônois est beaucoup plus rare que dans le secteur du Morvan. Seuls le **fer**, le **manganèse** et le **fluor** sont concernés.

La partie la plus au Nord du plateau haut-saônois, et appartenant au bassin RM & C, a un substratum triasique. Il existe de nombreuses sources ferrugineuses, avec quelques traces de **manganèse**, dans les grès bigarrés du Trias sur les secteurs de la Haute-Saône et de la Haute-Marne, comme par exemple à Luxeuil-les-bains (Théobald, 1968) ou encore à Monthureux-sur-Saône (Minoux *et al.*, 1974). Les concentrations en **fer** et en **manganèse** ne sont pas données par ces références.

#### • Les formations alluvionnaires

En ce qui concerne le domaine alluvionnaire, et plus précisément sur le bassin versant amont de la Saône, il existe des problèmes de teneurs élevées en **fer** et **manganèse** dans les eaux souterraines des alluvions. Les exemples sont nombreux : la Saône sur les captages de Gray (Chauve *et al.*, 1986), la Semouse à Saint-Loup-sur-Semouse (Deprez *et al.*, 1971).

La présence d'**arsenic** d'origine naturelle est également mentionnée par l'AERM&C (2004) dans la partie amont de la Saône (jusqu'à 96.7 µg/g d'arsenic sur bryophytes et 41 µg/g sur sédiments), de la Lanterne (jusqu'à 45 µg/g sur bryophytes et 30 µg/g sur

sédiments) et de l'Ognon (jusqu'à 12 µg/g sur bryophytes et 63 µg/g sur sédiments). Sur ces trois tronçons, les terrains traversés sont les grès du Trias. La présence de cet élément est toutefois probablement liée à l'existence locale de filons sulfurés dans ces niveaux.

### **Conclusion sur le fond géochimique**

Peu de secteurs sont concernés par les problèmes d'occurrences en éléments traces dans les eaux sur l'ensemble du plateau haut-saônois. Seules des teneurs anormalement élevées et très localisées en **fer** et en **manganèse** sont présentes dans les eaux souterraines des grès du Trias et dans celles des alluvions de la Saône et de Semouse.

En revanche, la zone du Morvan est plus riche en métaux, notamment dans les niveaux de base du Trias avec des minéralisations stratiformes dans les niveaux les plus perméables, et dans les fractures au contact des granites. Des occurrences naturelles en métaux, issues de ces formations ont été démontrées pour l'**arsenic** (Jauffrey, 2001) et pour le **zinc** (Barbier *et al.*, 1999).

## **3.14. LES PYRENEES ORIENTALES**

### **Rappel sur le contexte géologique**

La chaîne des Pyrénées, à l'image de la chaîne des Alpes, est géologiquement constituée d'une partie sédimentaire externe et d'une partie cristalline interne (Figure 24). En ce qui concerne le domaine sédimentaire, les formations sont carbonatées récentes et plissées, avec des alternances de marnes. En se rapprochant du socle, ces dernières sont métamorphisées.

Au cœur de cette couverture sédimentaire plissée, et par l'intermédiaire de jeux de failles inverses, des lambeaux de socle affleurent. Il s'agit des massifs de l'Agly et du Mouthoumet. Le premier est composé de terrains granito-gneissiques avec une couverture paléozoïque métamorphique et fortement déformée. Le second est exclusivement constitué d'une couverture paléozoïque peu métamorphique et karstique.

La partie interne des Pyrénées est granito-gneissique avec une couverture paléozoïque et avec d'autres formations métamorphiques comme les micaschistes.

Se jetant dans la mer Méditerranée, l'Agly, le Tech et la Têt sont les cours d'eau les plus importants de cette zone. Le domaine alluvial de la Têt est important et s'élargit brusquement pour laisser place à de vastes plaines dont les dépôts (fluvio-lacustres, molassiques) datent du Quaternaire et du Pliocène.

La limite Nord du secteur est représentée par la terminaison du massif du Mouthoumet et par le CFNP (Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen) ; alors qu'au Sud, elle est concordante à la limite entre la France et l'Espagne.

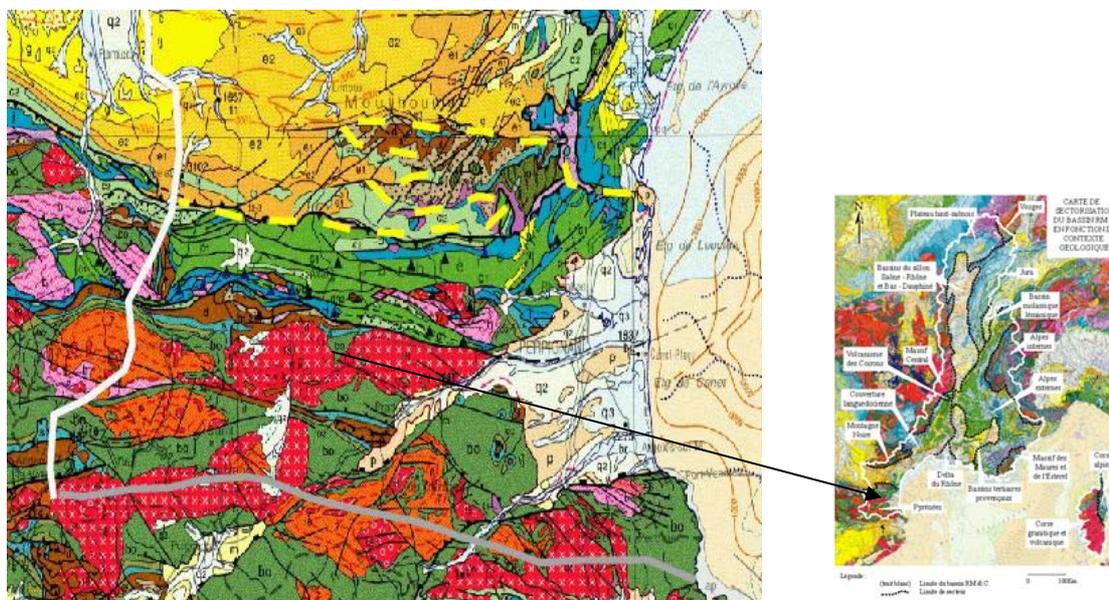


Figure 24 : Carte géologique des Pyrénées Orientales (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### Les principales occurrences en éléments traces

Les occurrences en éléments traces sur le secteur des Pyrénées Orientales sont nombreuses mais les quelques documents répertoriés ne traitent que du thème de la géologie, autrement dit des métaux uniquement dans les sols et non dans les eaux.

Cependant, il se peut que certaines zones des Pyrénées internes soient beaucoup plus riches en éléments traces aussi bien dans les sols (Guitard *et al.*, 1998) que dans les eaux du fait de la présence de formations hétérogènes dans le socle pyrénéen. En effet, des roches de nature diverse comme les granites, les gneiss, les schistes, les roches basiques et volcaniques sont susceptibles de renfermer des métaux aussi bien sous forme stratiforme que filonienne.

Une étude de valorisation de l'inventaire géochimique à l'échelle des Pyrénées Orientales a été réalisée par Salpeteur (1993). Les résultats de cette étude, dont le but est de faire le lien entre le contexte géologique et les sols et la présence potentielle d'éléments traces dans les eaux, sont les suivants :

- Le **baryum** est surtout localisé dans les formations métasédimentaires qui entourent le massif du Canigou. Il s'agit des schistes carbonatés de Canaveilles, des schistes noirs de Cabrils et des schistes et quartzites d'Evol. Les eaux

souterraines et de surface issues de ces terrains peuvent contenir des fortes teneurs en **baryum**.

- Le **chrome** est présent dans les zones où les roches sont ultrabasiques comme certaines intrusions dans le granite de Quéribus-Millas. Sa mise en solution dans les eaux dans de tels secteurs et à des concentrations significatives est peu probable.
- Le **cuivre** marque les faciès les plus riches en pyrite appartenant à la formation de Cabrils. De même que pour le **cadmium**, il est difficile de le retrouver naturellement dans les eaux à des concentrations significatives.
- Le **nickel** se concentre particulièrement dans les roches enrichies en pyrite des séries de Canaveilles et de Cabrils bordant le Canigou. Par oxydation de la pyrite, il est possible de retrouver des teneurs significatives en **nickel** de l'ordre de plusieurs µg/L dans les eaux souterraines et les sources issues de ces formations.
- Le **zinc** se localise en teneurs plus importantes dans les schistes noirs de la couverture métamorphique primaire bordant le Canigou. De fortes concentrations dans les eaux souterraines et de surface sont susceptibles d'exister dans ces secteurs.
- Le **manganèse** caractérise le plus souvent les zones dolomitiques et sidéritiques. Des teneurs significatives dans les eaux souterraines sont possibles si les conditions du milieu sont optimales pour sa solubilisation.
- Le **fer** est corrélé au **manganèse**. Il est le plus abondant dans les schistes noirs à la périphérie du dôme du Canigou. Des concentrations élevées en **fer** de plusieurs milligrammes par litre dans les eaux souterraines de tels secteurs sont tout à fait possibles.

#### • La couverture primaire

La couverture primaire que l'on rencontre dans les Pyrénées est plus ou moins similaire à celle existante dans la Montagne Noire, si bien que les occurrences en éléments traces citées précédemment peuvent être transposées sur ce secteur, et notamment pour le massif du Mouthoumet qui n'est séparé de la Montagne Noire que par la vallée de l'Aude.

Les minéralisations en éléments traces sont nombreuses sur les formations primaires du Mouthoumet. Par exemple, les dolomies et les calcaires dévoniens possèdent en amas stratiforme, en remplissages karstiques ou en filons des éléments comme le **fer**, le **manganèse**, le **baryum**, le **cuivre**, le **plomb** et plus rarement l'**antimoine**, l'**arsenic** et le **zinc** (Berger *et al.*, 1997 ; Ellenberger *et al.*, 1985).

En revanche, la couverture primaire du massif de l'Agly est schisteuse au sommet et micaschisteuse à la base. Elle est recoupée par de nombreux filons qui, localement, contaminent les eaux de surface comme à Rasiguère où les filons d'hématite donne une coloration rougeâtre aux eaux des petits cours d'eau en présence de **fer**.

Pour le secteur des Pyrénées internes, les minéralisations sont tout aussi nombreuses et concernent globalement des éléments comme le **fer**, le **plomb**, le **zinc**, le **cuivre**, le **manganèse**, l'**arsenic** et le **baryum**. Elles sont plus importantes au contact entre la couverture primaire et les gneiss, comme sur le secteur du Canigou (Marcoux *et al.*, 1991).

Pour le département des Pyrénées Orientales, l'**arsenic** présent dans les eaux souterraines utilisées pour l'AEP est d'origine naturelle et sa teneur est liée aux types de roches rencontrées. Une campagne de mesures en 1999 montre que la plupart des réseaux de distribution du département délivrent une eau contenant moins de 10 µg/L d'**arsenic** (Rapport du Ministère chargé de la Santé, 2000). Trois ouvrages présentent des valeurs en **arsenic** entre 10 et 50 µg/L avec un maximum de 100 µg/L à Montferrer dans les micaschistes à intercalations de dolomies à la périphérie du Mont Canigou.

#### • Les formations granito-genissiques

Les occurrences en métaux sont beaucoup moins nombreuses dans les formations granitiques et gneissiques que dans la couverture primaire. Elles existent sous forme de filons et intéressent les éléments comme le **baryum** (Fontelles *et al.*, 1993), le **fer**, le **plomb** et le **zinc**.

#### • La couverture mésozoïque et les dépôts pliocènes

Quelques occurrences en métaux existent dans les terrains sédimentaires du Trias (**baryum**), dans les niveaux du Crétacé supérieur (**fer** avec la présence de sources ferrugineuses) et dans les formations bauxitiques (**aluminium** et **fer**).

Les eaux souterraines de la vallée de la Têt ainsi que celles des formations alluviales pliocènes peuvent contenir des teneurs fortes en **fer** et **manganèse** si les conditions Eh-pH du milieu sont optimales pour leur mise en solution.

Dans les eaux du Tech à l'aval d'Amélie les Bains, des mesures réalisées par l'AERM&C (2004) dans le cadre du RNB ont montré la présence de zinc en teneurs significatives dans les bryophytes (jusqu'à 1113 µg/g). Bien que la présence de zinc dans ce secteur puisse être d'origine naturelle (voir plus haut), il est difficile d'en être formel. Sur cette même station, les valeurs sur sédiments sont en effet beaucoup plus faibles (102 µg/g au maximum). Grâce au croisement de différentes données, ce point pourra être éclairci au cours de la phase 2 de l'étude.

### **Conclusion sur le fond géochimique**

Les études sur les métaux dans les eaux du secteur des Pyrénées orientales sont quasi inexistantes, malgré la richesse géologique de certains secteurs en éléments traces, comme la couverture primaire bordant les gneiss du Canigou. De ce fait, il est difficile de se faire une idée des réels problèmes d'occurrences d'éléments traces dans les eaux.

Toutefois, on peut s'attendre, localement, à des teneurs significatives dans les eaux d'éléments comme le **fer**, le **manganèse**, le **baryum**, le **fluor** et l'**arsenic**.

### 3.15. LES VALLEES DU RHONE ET DE LA SAONE

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Ce chapitre ne concerne que les formations alluviales et quaternaires de la ligne Nord-Sud décrite par les rivières de la Saône et du Rhône, de Chalon-sur-Saône à Avignon. En général, les alluvions récentes du Rhône et de la Saône sont de faible épaisseur, de l'ordre de la dizaine de mètres au maximum.

Ces dépôts constituent un réservoir d'eau très exploité actuellement, pour ces territoires densément peuplés et à forte activité (alimentation en eau potable, industrie, agriculture).

#### ***Les principales occurrences en éléments traces et conclusion sur le fond géochimique***

Les occurrences en éléments traces dans les eaux souterraines et de surface de la vallée du Rhône sont très nombreuses et traitent essentiellement du même sujet, à savoir le **fer** et le **manganèse** dans les eaux souterraines.

##### **• Les éléments traces d'origine naturelle dans les eaux souterraines**

Ce que l'on retiendra, pour les eaux souterraines des systèmes alluviaux du Rhône et de la Saône, c'est qu'il peut exister des fortes teneurs en **fer** et en **manganèse** d'origine naturelle, qui peuvent approcher ou dépasser le seuil de potabilité, lorsque les conditions physico-chimiques du milieu permettent la mise en solution des métaux (ANTEA Agence Rhône Alpes, 1999 ; Graillat, 1997 ; Travi *et al.*, 2000 ; Valencia, 2000).

Les sédiments des alluvions contiennent une fraction de cadmium (0.9 +/- 0.6 mg/L) ; ceci est dû à la nature des sédiments provenant des reliefs montagneux avoisinants. En milieu réducteur et à pH supérieur à 8, le **cadmium** peut être libéré sous forme dissoute dans les eaux souterraines (Hyunh-Ngoc *et al.*, 1987).

##### **• Les éléments traces d'origine anthropique dans les eaux de surface et les eaux souterraines**

Les éléments traces retrouvés dans les eaux de surface et souterraines de la vallée du Rhône et de la Saône sont variés et leurs localisations dépendent de l'activité agricole ou industrielle qui leur sont associées.

Les pollutions d'origine anthropique sont diffuses ou ponctuelles, c'est ainsi qu'il peut exister des variations saisonnières importantes de concentration en métaux.

Busse (1980) a réalisé une étude portant sur les sources de pollution et leurs substances indésirables ou toxiques associées (Tableau 11). Ce rapport comprend seulement la région lyonnaise, mais il est possible de transposer ces résultats à l'ensemble du secteur.

	Al	Cu	Fe	Mn	Zn	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Se
Alliages												
Céramiques/Verrerie												
Chimie												
Colorant												
Cosmétique												
Désinfection												
Electricité												
Galvanoplastie												
Gaz/Essence												
Métallurgie												
Papeterie												
Peinture/Vernis												
Pesticides												
Pharmacie												
Photographie												
STEP												
Tannerie												
Textile												

Tableau 11 : Les activités industrielles de la région lyonnaise et leurs polluants associés (d'après Busse, 1980).

Ce type de matrice est également disponible à l'échelle nationale pour l'ensemble des activités référencées par codes NAF (BRGM, 1997e; Blum *et al.*, 2002).

Enfin, d'après l'AERM&C (2004), différentes stations de mesures situées sur le Rhône mettent en évidence une pollution du fleuve par le **mercure**.

### 3.16. LES MAURES ET L'ESTEREL

#### **Rappel sur le contexte géologique**

Le massif ancien varois est constitué de roches métamorphiques intensément plissées (phyllades de Sicié ou micaschistes, gneiss fins, gneiss oillés, amphibolites et leptynites des Maures Occidentales, ou encore, migmatites des Maures Orientales). Il s'agit donc d'un ensemble de formations rocheuses sédimentaires (couverture primaire) ou magmatiques (Figure 25). Ce socle serait lui-même issu d'un vieux socle granitisé (Cadomien).

Sur ce secteur est localisée une dépression permienne gréseuse (érosion et accumulation de sédiments). Elle débute à Sanary-sur-Mer, pour s'achever dans la région de Saint-Aygulf, et elle constitue la bordure Nord-Est des Maures et de l'Estérel. Des remontés et des épanchements basaltiques accompagnent cette période de distension.



### **Rapport entre la lithologie et les éléments traces**

En résumé pour ce secteur sur les principales occurrences en éléments traces, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 12). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Encaissant		Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
Socle cristallin	Granites	Ba F Pb Zn	Ba F
	Gneiss	Ba F Pb Zn	Ba F
	Mylonites	Ba F	Ba F
	Diorites, amphibolites	Ba F Fe Pb Zn	Ba F Fe
	Migmatites	Ba F Pb Zn	Ba F
Couverture primaire métamorphique	Schistes, micaschistes, phyllades, quartzites	Al As Ba Cu F Fe Mn Pb Zn	As Ba F Fe Mn
Domaine détritique et volcanique Permo Carbonifère	Volcanisme (dolérites, rhyolites, basaltes)	Ba F Fe Pb	Ba F Fe
	Grès et arkoses	Ba F Fe Mn Pb	Ba F Fe Mn
	Schistes houillers	Fe	Fe

Tableau 12 : Relation entre lithologie et éléments traces pour le secteur des Maures et de l'Esterel.

### **Conclusion sur le fond géochimique**

Tout comme les Pyrénées, les études sur les métaux dans les eaux du secteur du socle provençal varois sont quasi inexistantes, malgré la richesse géologique de certains secteurs en éléments traces, comme la couverture métamorphique. De ce fait, il est difficile de se faire une idée des réels problèmes d'occurrence naturelle en éléments traces dans les eaux.

## **3.17. LE VOLCANISME DES COIRONS**

### **Rappel sur le contexte géologique**

Le massif des Coirons est un petit plateau basaltique d'environ 18 km de long sur 11 km de large situé au Sud de Privas avec une altitude moyenne d'environ 700 m (Figure 26). Il est bordé à l'Est par la vallée du Rhône et à l'Ouest par une zone faillée marquant les contreforts du Massif Central.



une source sous-basaltique. L'origine de cette anomalie pourrait être naturelle et liée à un apport d'éléments du socle sous-jacent.

### 3.18. LES VOSGES

#### ***Rappel sur le contexte géologique***

Le massif des Vosges, qui s'étend de Belfort aux environs de Strasbourg, est composé d'une partie gréseuse au Nord et d'une partie cristalline au Sud. Les eaux en surface de ce massif rejoignent à la fois le bassin du Rhin, de la Seine et du Rhône. En ce qui concerne le bassin RM & C, seul l'extrême secteur Sud du domaine cristallin est concerné (Figure 27).

Les Vosges du Sud sont composées des terrains volcaniques et sédimentaires dont l'âge est surtout Tournaisien et Viséen. Les massifs granitiques hercyniens constituent les reliefs les plus importants comme les granites des Ballons (Ballon d'Alsace, 1250m).

La limite entre Vosges, Jura et plateau haut-saônois est représentée par la limite Permien-Trias.

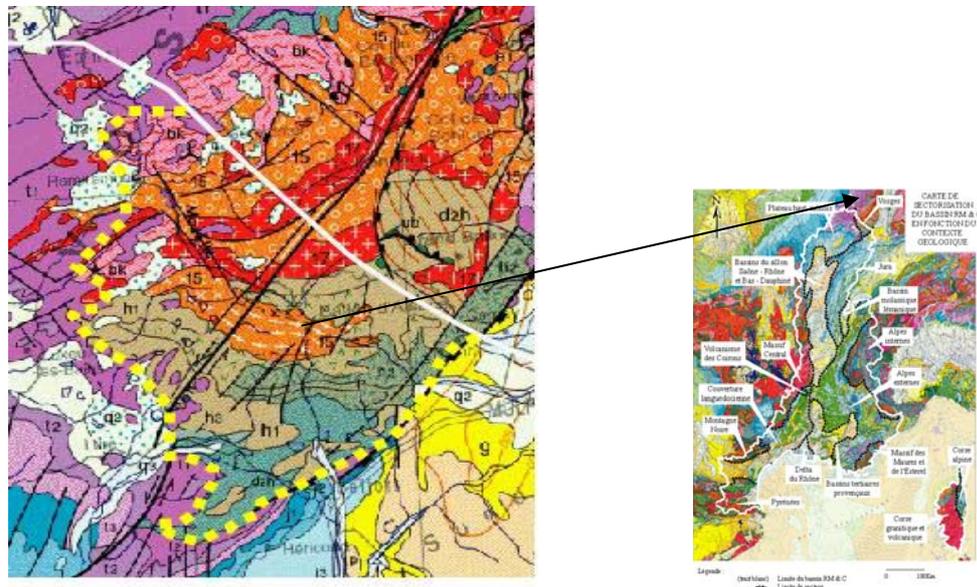


Figure 27 : Carte géologique des Vosges (extrait de la carte géologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000).

### **Les principales occurrences en éléments traces**

Les occurrences en éléments traces dans les roches, dans le massif des Vosges, sont nombreuses, voire très importantes dans certains secteurs. Néanmoins, peu de références pertinentes concernant les métaux dans les eaux ont été trouvées et les quelques documents consultés ne traitent que du lien entre géologie et éléments traces dans les sols.

Les formations volcano-sédimentaires métamorphiques rencontrées dans les Vosges du Sud sont riches en métaux en amas stratiformes ou en filons, si bien qu'elles recèlent les plus grandes concentrations du socle vosgien. Les minéralisations les plus courantes sont filoniennes et contiennent du **plomb**, **zinc**, **fer**, **manganèse**, **cuivre**, **arsenic**, **baryum** et **argent** (BRGM, 1997a ; Théobald *et al.*, 1974).

Pour les secteurs granitiques, le constat est le même. Ils sont recoupés par de très nombreux filons, mais cela ne concerne qu'un nombre plus limité d'éléments traces comme le **fer**, le **baryum** et le **fluor** (Coulon *et al.*, 1986). Notons toutefois la présence de **chrome** marqueur de granites sub-alcalins (BRGM, 2000).

### **Rapport entre la lithologie et les éléments traces dans les eaux**

En résumé sur les principales occurrences en éléments traces dans le secteur des Vosges, un tableau de synthèse est proposé (Tableau 13). Il illustre, pour un contexte géologique donné, les éléments traces présents dans les roches ainsi que ceux susceptibles de donner aux eaux de surface et/ou souterraines des concentrations significatives.

Encaissant		Eléments traces potentiellement présents sous forme minéralisée	Eléments traces pouvant être retrouvés en concentrations significatives dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines
Granites des Ballons		Ba F Fe	Ba F Fe
Granites sub-alcalins des Ballons		Ba Cr F Fe	Ba F Fe
Viséen	Volcano-sédimentaire	Ag As Ba Cu Fe Mn Pb Zn	As Ba Fe Mn
Tournaisien		Ba Fe Mn	Ba Fe Mn
Permien	Grès	Ba Fe Mn	Ba Fe Mn

Tableau 13 : Relation entre lithologie et éléments traces dans le secteur des Vosges.

### **Conclusion**

La présence d'éléments traces dans les eaux d'origine naturelle n'est pas réellement définie à ce jour. Les informations disponibles traitent surtout des anomalies dans les sols en fonction du contexte géologique comme le montre le rapport du BRGM (1997a).

Le contexte géologique le plus riche en traces est le secteur des formations volcano-sédimentaires primaires qui contiennent de très nombreux gisements de sulfures. La mise en solution de métaux dans les eaux est probable et certains éléments comme l'**arsenic**, le **fer**, le **baryum**, le **manganèse**, le **fluor** et le **zinc** sont sans doute présents en concentrations plus ou moins significatives.

### 3.19. AUTRES SECTEURS, AUTRES TYPES DE DONNEES

D'autres références situées en dehors du bassin Rhône – Méditerranée et Corse peuvent être intéressantes à considérer. On notera ainsi que la présence de **baryum** dans une gamme de concentration comprise entre 60 et 100 µg/L a été signalée par Dematteis (1995) dans les calcaires du Callovien des Alpes Suisses. Des valeurs de 100 à 220 µg/L ont également été relevées par le même auteur en Italie dans l'Apennin Central (La Maiolica, calcaires micritiques du Malm et du Crétacé inférieur). Dematteis (1995) s'est également intéressé à d'autres éléments traces. Il a ainsi mesuré le **fluor** dans les eaux de différents aquifères carbonatés européens. La plupart des échantillons montrent cependant des valeurs inférieures au seuil analytique de 0.2 mg/L. Dans seulement un site de mesure, la concentration en **fluor** est significative. Elle atteint 0.53 mg/L dans des calcaires du Lias inférieur du massif des Apennins. On notera aussi que dans deux des aquifères carbonatés étudiés par ce même auteur (Alpes Suisses et calcaires récifaux de Massiccio dans les Apennins), la présence de **bore** a été relevée (35 à 55 µg/L). En ce qui concerne l'**aluminium** auquel Dematteis (1995) s'est également intéressé, on retiendra que des valeurs élevées (> 30 µg/L) ont été mesurées dans les aquifères des Dolomies et du karst des environs de Trieste.

De même, en l'absence de données suffisantes, dans les eaux de surface en particulier, certains travaux réalisés dans un cadre plus général s'avèrent intéressants. C'est ainsi que les travaux de Meybeck (1984), bien que principalement axés sur les éléments majeurs dans les cours d'eau, offrent de précieux renseignements sur les teneurs en bore et en **fluor** dans les eaux courantes et leur lien avec le contexte géologique. D'après les observations réalisées par l'auteur, les teneurs en **fluor** sont particulièrement constantes d'un type de bassin à l'autre. Seules les eaux de drainage d'évaporites présentent des teneurs plus élevées (Tableau 14). La moyenne des concentrations naturelles en **fluor** dans les cours d'eau serait ainsi de 65 µg/L sans les évaporites et de 85 µg/L avec ces dernières.

<b>Types de roches drainées</b>	<b>Médiane des concentrations en fluor dans les cours d'eau (en µg/L)</b>
Gneiss et granites	57
Micaschistes	76
Roches métamorphiques basiques (amphibolite, serpentine, prasinite)	66.5
Basaltes – Ordanchites – Trachy-andésites	47.5
Grès grauwackes	76
Arkoses	57
Roches détritiques carbonatées	57
Roches calcaires	76
Schistes à houille	95
Evaporites	285

Tableau 14 : Médianes des teneurs en fluorures dans les eaux de surface drainant différents types de roches. D'après Meybeck, 1984.

Meybeck (1984) s'est également intéressé au **bore** dans les eaux courantes. Il existe trois origines possibles à la présence de cet élément dans les eaux de surface : l'altération des silicates (tourmaline, biotite, amphiboles), les apports atmosphériques océaniques, et les argiles marines. L'interprétation des teneurs en bore dans les cours d'eau est cependant rendue souvent difficile par sa sensibilité aux pollutions (pollutions urbaines en particulier). D'après Meybeck, à partir d'une distance de 200 km de la côte, les eaux de surface ne sont plus influencées par le bore d'origine atmosphérique. Le Tableau 15 présente les médianes des concentrations en bore pour les principaux types de roches. On retiendra que les plus fortes valeurs sont attendues dans les eaux drainant des argiles, associés ou non à des évaporites. Il arrive en effet que le bore ne soit pas abondant dans certaines évaporites. C'est le cas des gypses de Pralognan où la concentration mesurée est égale à 13 µg/L.

<b>Types de roches drainées</b>	<b>Médiane des concentrations en bore dans les cours d'eau (en µg/L)</b>
Granites	22
Roches métamorphiques	12
Roches volcaniques	15
Roches carbonatées	10
Roches sédimentaires argileuses	40
Schistes et grès	10
Marnes évaporitiques	150

Tableau 15 : Médianes des teneurs en bore dans les eaux de surface drainant différents types de roches. D'après Meybeck, 1984.

## Conclusions

Cette première phase de l'étude consacrée à l'identification des secteurs à risque de fond géochimique élevé dans les eaux du bassin Rhône – Méditerranée et Corse a permis de collecter un certain nombre de données brutes et de disposer des références bibliographiques pertinentes.

Les **données brutes** (analyses chimiques dans les eaux souterraines et dans les cours d'eau, analyses en éléments traces dans les sols, indices miniers, ...) permettront, au cours de la phase 2 de l'étude, de délimiter les zones dont les eaux sont susceptibles de présenter un fond géochimique en éléments traces élevé.

La **recherche bibliographique** a quant à elle permis de reconnaître pour chaque secteur géologique du bassin les éléments susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines et/ou dans les cours d'eau. On retiendra ainsi que, bien que le **fer** et le **manganèse** soient les éléments les plus couramment rencontrés à l'état naturel (mais aussi les plus mesurés), dans les eaux souterraines en particulier, il ne faut pas exclure d'autres occurrences significatives comme celles du **baryum** (dans les carbonates comme dans les régions de socle), du **zinc**, du **fluor** (dans les régions de socle en particulier), et de l'**arsenic** et de l'**antimoine** dans les massifs cristallins (Alpes internes, Corse alpine, Massif Central, Pyrénées). Avec des probabilités plus faibles, d'autres éléments sont susceptibles d'être présents. Il s'agit du **cuivre** (dans les carbonates comme dans les zones de socle), du **chrome** ou encore de l'**aluminium**. Pour ces substances les concentrations sont toutefois très basses.

Cette synthèse bibliographique a également montré que les références sur la présence d'éléments traces à l'état naturel dans les eaux du bassin, et dans les cours d'eau en particulier, étaient relativement rares. Le sujet reste encore peu étudié. Les raisons de ce constat sont simples :

- absence d'intérêt économique pour la recherche d'éléments trace dans les eaux, et donc peu d'informations sur les éléments traces dans les eaux alors que les données sols et roches sont beaucoup plus abondantes ;
- Les coûts des analyses des éléments traces dans les eaux sont relativement élevés.
- Les analyses en traces dans les eaux ont été souvent réalisées à l'aval des sites miniers dans le but de définir les impacts des exhaures minières sur l'environnement ;
- Les problèmes de teneurs naturelles anormalement élevées en éléments traces dans les eaux n'étaient pas réellement d'actualité il y a plusieurs dizaines d'années. L'accroissement de l'intérêt porté à leur présence dans les eaux ces dernières années s'explique en partie par l'abaissement des normes de potabilité

pour certains paramètres et par les exigences de la Directive Cadre sur l'Eau en matière de caractérisation des masses d'eau.

Ce manque de références bibliographiques sur les eaux a conduit à l'utilisation fréquente d'autres types d'information comme celles fournies par les notices des cartes géologiques au 1/250 000. Le recours à ce type de sources bibliographiques, à la fois très riche (bonne couverture géographique) mais également trop imprécis concernant les eaux (pas de mesure des concentrations), explique que la présence de tel ou tel élément est souvent « supposée » ou « probable » et qu'il n'est pas possible de définir l'ordre de grandeur des concentrations dans lesquelles il est présent.

Malgré ces lacunes, les références consultées permettent d'esquisser une image des zones les plus susceptibles de présenter un **fond géochimique élevé** en éléments traces dans les eaux. Les deux grands domaines concernés sont les **zones de socle et le Trias**.

A contrario, des secteurs à fond géochimique **pauvre** en éléments traces se dégagent sur le bassin RM & C. Ils correspondent à des territoires situés en terrain **sédimentaire et « récents »** (postérieurs au Trias).

En conclusion de la phase 1 de l'étude, le tableau suivant propose une synthèse des contaminations naturelles des eaux du bassin Rhône – Méditerranée & Corse par les éléments traces en fonction du contexte géologique (Tableau 16). Les probabilités exposées dans ce tableau reflètent à la fois le nombre d'occurrence mais également l'ordre de grandeur des concentrations. Ce tableau concerne à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines mais il convient de noter que pour certains paramètres comme le fer et le manganèse, les occurrences sont souvent liées à des conditions d'oxydoréduction particulières que l'on ne rencontre que dans les aquifères (nappes captives). D'autre part, seuls les petits cours d'eau en tête de bassin versant sont concernés par ces corrélations. Pour les systèmes plus importants comme le Rhône, la variété géologique des terrains influençant le chimisme des eaux est telle qu'il n'est pas possible de corrélérer simplement la lithologie et la présence potentielle de chaque élément.

A l'issue de cette première phase de l'étude consacrée au recueil des données brutes et de références bibliographiques sur le bassin Rhône – Méditerranée et Corse, une deuxième partie de l'étude va débuter. Celle-ci sera consacrée à l'identification proprement dite des zones à risque de fond géochimique élevé dans les eaux du bassin. A partir des données brutes collectées, un travail de cartographie des zones « à fond géochimique élevé » sera réalisé.

Secteurs	Éléments traces dans les eaux de surface et/ou souterraines															
	Toxiques							Indésirables								
	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Sb	Se	Al	Ag	Ba	Cu	F	Fe	Mn	Zn
Alpes extenes																
Alpes internes																
Bassin molassique suisse																
Bassins tertiaires (Bresse..)																
Bassins tertiaires provençaux																
Corse alpine																
Corse granitique et volcanique																
Couverture languedocienne																
Delta du Rhône																
Jura																
Massif Central																
Montagne Noire																
Plateau haut-saônois et Morvan																
Pyrénées																
Vallées du Rhône et de la Saône																
Var																
Volcanisme des Coirons																
Vosges																

Légende

-  Très forte à forte probabilité de présence naturelle dans les eaux souterraines à des concentrations significatives
-  Moyenne à faible probabilité de présence naturelle dans les eaux souterraines à des concentrations significatives
-  Très faible probabilité à probabilité nulle de présence naturelle dans les eaux souterraines à des concentrations significatives

Sont signalés en rouge les secteurs de socle et en noir les zones sédimentaires

**Attention** : \* pour les eaux de surface, ce tableau ne concerne **que les petits cours d'eau** en tête de bassin versant. Il n'est en aucun cas représentatif des systèmes les plus importants. Ces derniers drainent en effet des terrains nombreux et aux contextes géologiques variés.

\*\* d'autre part, la présence de certains éléments concerne essentiellement les eaux souterraines dont le caractère parfois captif favorise la mise en solution de certains éléments traces. C'est en particulier le cas du **fer** et du **manganèse**.

Tableau 16 : Evaluation de la probabilité de la présence naturelle des éléments traces dans les eaux souterraines et les petits cours d'eau en fonction du contexte géologique dans le bassin Rhône – Méditerranée & Corse.



## Bibliographie générale

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (2005) – Qualité des eaux superficielles et souterraines en Rhône – Méditerranée. Situation en 2003, 16p.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (2004) – Qualité des cours d'eau. Réseau National des Bassins Rhône – Méditerranée et Corse. Résultats 2002, 77p.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (2003) – Qualité des cours d'eau. Réseau National de Bassin Rhône – Méditerranée – Corse. Résultats 2001, 75p.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (2001) – Qualité des cours d'eau. Réseau National de Bassin Rhône – Méditerranée – Corse. Résultats 2000, 73p.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (2001) – Qualité des cours d'eau. Réseau National de Bassin Rhône – Méditerranée – Corse. Résultats 1999, 70p.

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (1991) – Réseau de surveillance des eaux souterraines dans le département de la Drôme. Synthèse, conclusions et perspectives. 17p.

AICARD P., CAIA J., PERONNE Y., et al. (1974) – District filonien (fluor, baryum, plomb et zinc) des Maures orientales. Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, n°2, 1p.

ALABOUVETTE A., PELLET J., ROUIRE J., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 887 Génolhac, BRGM ed., 62p.

ALABOUVETTE B., BODEUR Y., MATTEI J., et al. (1987) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 962 Le Caylar, BRGM ed., 63p.

ANCEL A., MOULIN M., RAMPNOUX N. (2004) – Etat des connaissances géologiques structurales et hydrogéologiques du bassin d'Aix-Gardanne. Rapport BRGM/RP-53238-FR, 114p.

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1999) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1999. Rapport ANTEA n°A18296, 129p.

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1997) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1997. Rapport ANTEA n°A11318, 165p.

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1995) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1995. Rapport ANTEA n°A04372, 133p.

ANTOINE P., BARFETY J.C., VIVIER G., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 727 Bourg-Saint-Maurice, BRGM ed., 120p.

ANTOINE P., BARBIER R., BARFETY J.C., et al. (1983) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 750 La Rochette, BRGM ed., 45p.

ANTOINE P., CORBIN P., OULIANOFF N., et al. (1979) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 704 Mont Blanc, BRGM ed., 22p.

ARENE J., TEGYEY A., GROS Y., et al. (1977) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 624 Cluny, BRGM ed., 40p.

ARMAUDRIC DU CHAFFAUT S., CARON J.M., JAUZEIN A., et al. (1983) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1114 Venaco, BRGM ed., 41p.

ARTHAUD F., FEIST R., MEDIONI R., et al. (1982) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 989 Lodève, BRGM ed., 52p.

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995a) – Valorisation de l'inventaire géochimique du département de l'Ardèche. Rapport BRGM/RP-38398-FR, 22p.

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995b) – Valorisation de l'inventaire géochimique du département de la Loire. Rapport BRGM/RP-38397-FR, 21p.

ATTEIA O., THELIN P., PFEIFER H.R., et al. (1995) – A search for the origin of cadmium in the soil of the Swiss Jura. *Geoderma*, vol.66, n°3, 149-172.

BARBIER J., CHERY L. (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. Rapport BRGM/RP-40448-FR, 51p.

BARBIER J., CHERY L. (1997) – Relation entre fond géochimique naturel et teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux. Rapport BRGM/RP-39544-FR, 51p.

BARBIER J., CHERY L. (1995) – Valorisation des données de l'inventaire géochimique pour l'identification des risques de teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux. Vol. 1 : étude de faisabilité, 52 p ; vol. 2 : Inventaire géochimique du territoire français : commentaires et explication pour une meilleure exploitation des données, 25 p, rapport BRGM R38721.

BARBIER R., BARFETY J.C., BORDET P., et al. (1977) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 774 Saint-Jean-de-Maurienne, BRGM ed., 43p.

BARBIER R., BARFETY J.C., BORDET P., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 798 La Grave, BRGM ed., 44p.

BARDOSSY G. (1997) – Berthier, les Baux et l'histoire de la bauxite. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, Série II, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol.324, n°12, 1031-1040.

BARFETY J.C., LEMOINE M., MERCIER D., et al. (1996) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 823 Briançon, BRGM ed., 180p.

BARFETY J.C., APRAHAMIAN J., DEBELMAS J., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 821 La Mure, BRGM ed., 98p.

BARFETY J.C., DEBELMAS J., GIDON P., et al. (1984) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 822 Saint-Christophe-en-Oisans, BRGM ed., 64p.

BARFETY J.C., BORDET P., BORNUAT M., et al. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 797 Vizille, BRGM ed., 35p.

BEUCAIRE C., TOULHOAT P. (1987) – Redox chemistry of uranium and iron, radium geochemistry, and uranium isotopes in the groundwater of the Lodeve basin, Massif Central, France. Applied Geochemistry, vol.2, 417-426, 1987.

BELLIÈRE J., OULIANOFF N., BARFETY J.C., et al. (1987) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 680 Chamonix, BRGM ed., 39p.

BENKÖ D., GROS J.J., CHENEVOYM., et al. (1977) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 818 Valence, BGRM ed., 51p.

BERGER G., ALABOUVETTE B., BESSIERE G., et al. (1997) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1078 Tuchan, BRGM ed., 113p.

BERGER G., DEBAT P., DEMANGE M., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1037 Carcassonne, BRGM ed., 78p.

BERGER G., ELMI S., BROUDER P., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 888 Bessèges, BRGM ed., 115p.

BERGER G., LEFEBVRE A., TURC R., et al. (1978) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 912 Alès, BRGM ed., 58p.

BAIZE D. (1997) – Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA ed., 408p.

BLUM A., CHERY L., BARBIER J., BAUDRY D., PETELET-GIRAUD E. (2002) – Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport BRGM/RP-51549-FR.

BORDET P., CHAMLEY H., BLANC J.J., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1065-1080 Hyères-Porquerolles, BRGM ed., 21p.

BOULALON J. (1977) – Les gisements de plomb-zinc-argent du Massif central. Bulletin du BRGM, deuxième série, n°2, 67-90, 1977.

BOULADON J., PICOT P. (1968) – Sur la minéralisation en cuivre des ophiolites de Corse, des Alpes françaises et de la Ligurie. Bull. BRGM, série II, n°1, 1968, 24-37.

BRGM (2005) – Qualité naturelle des eaux souterraines : Méthodologie et caractérisation des états de références des aquifères français, Collections Techniques, à paraître. BRGM ed.

BRGM (1999) – Expertise sur les origines de la pollution du forage du C.C.T. de la DRIRE. Rapport BRGM/RP-40659-FR.

BRGM (1998) – Mise à disposition de l'inventaire géochimique sur le territoire national. Rapport BRGM/RP-40207-FR.

BRGM (1997a) – Cartographie des concentrations et des fonds géochimiques métalliques connus du massif des Vosges. Rapport BRGM/RP-39979-FR, 21p.

BRGM (1997b) – Valorisation de l'inventaire minier national, cartographie des concentrations en métaux du département du Rhône. Rapport BRGM/RP-39628-FR, 15p.

BRGM (1997c) – Les métaux lourds dans les eaux destinées à la consommation humaine. Etude de la zone à risques potentiels de la région Balagne-Filosorma. Rapport BRGM/RP-39511-FR, 10p.

BRGM (1997d) – Métaux lourds en Corse du Sud. Rapport BRGM/RP-39840-FR, 49p.

BRGM (1997e) – Gestion des sites (potentiellement) pollués. Editions du BRGM, 40 p., 10 annexes.

BRGM (1996) – Pollution par les métaux lourds des eaux destinées à la consommation humaine, étude de la zone à risque potentiel du Cap Corse. Phase I. Rapport BRGM/RP-38649-FR, 15p.

BRGM (1995a) – Pollution par métaux lourds et arsenic des eaux destinées à la consommation humaine, étude méthodologique du bassin versant de la Bravone. Rapport BRGM/RP-38545-FR, 29p.

BRGM (1995b) – Sécurité des anciennes mines de fer d'Ougney (Jura). Rapport BRGM/RP-38577-FR, 16p.

BRGM (1994) – Risque de pollution par métaux lourds (arsenic) des eaux destinées à la consommation humaine. Identification des zones susceptibles d'être contaminées en liaison avec les indices et travaux miniers en Haute-Corse. Rapport BRGM/RP-38190-FR, 15p.

BRGM (1990) – Etude des ressources en eau dans les nappes profondes. Rapport BRGM N 0042 RHA 093.

BRGM (1985) – Surveillance de la qualité des eaux de la nappe de La Crau. Rapport BRGM 85 SGN 234 PAC, 6p.

BRGM (1982) – Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000. Feuille Strasbourg, BRGM ed.

BRGM (1980) – Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000. Feuille Marseille, BRGM ed.

BRGM (1979) – Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000. Feuille Lyon, BRGM ed.

BUATIER C. (1994) – Caractérisation et analyse de la mobilité et de la biodisponibilité du nickel dans les sols agricoles. Le cas du Pays de Gex (Ain). Etude ADEME, 180p.

BUSSE J.F. (1980) – La pollution dans la nappe des formations quaternaires de l'Est de Lyon (France). Thèse, université de Grenoble.

CAMPREDON R., BIJU-DUVAL B., CASTELAIN J., et al. (1980) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 945 Entrevaux, BRGM ed., 18p.

CELARDIN F., CHATENOUX L., ERSU P. (1989) – Métaux lourds dans les sols du Bassin Genevois. Archives des sciences, Genève, vol.42, 493-498.

CHAPAT M., BAYLET R. (1984) – Relations entre agressivité et concentration en plomb, zinc et cuivre dans les eaux de distribution de la Lozère. Techniques et Sciences Municipales, n°2, 73-80.

CHAROLLAIS J., RUCHAT C., GINET C., et al. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 678 Annecy-Bonneville, BRGM ed., 139p.

CHAUVE P., MANIA J., MIGNOT C., et al. (1986) – Paramètres physico-chimiques, lithologiques et hydrologiques influençant l'évolution dans le temps des teneurs en fer et en manganèse ; critique des résultats obtenus sur des champs expérimentaux de la plaine alluviale de la Saône (Franche-Comté). Journal of Hydrogeology, vol.86, n°3/4, 367-390, 1 octobre 1986.

CHENEVOY M., SAHUC S., SERANO J.J., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 769 Annonay, BRGM ed., 84p.

CHERMETTE A. (1975) – L'ancienne mine de manganèse de Romanèche (Saône-et-loire). Supplément au Bulletin mensuel de la Société Linnéenne de Lyon, 44e année, n°3, mars 1975.

CONCHON O., GAUTHIER A., MARRE J. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1126 Roccapina, BRGM ed., 47p.

CONCHON O., GAUTHIER A., MARRE J. (1984a) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1123 Sartène, BRGM ed., 62p.

CONCHON O., GAUTHIER A., ROSSI P., et al. (1984b) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1120 Ajaccio, BGRM ed., 44p.

COULON M., PAICHELER J.C., GUERIN H. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 412 Thann, BRGM ed., 137p.

COULON M. (1979) – Milieux de sédimentation, strontium et manganèse dans les calcaires à entroques de Bourgogne (Jurassique moyen). Bulletin de la Société Géologique de France, vol. 21, n°6, 681-685.

CROUZET J., TOLLON F., et al. (1980) – Le gisement stratiforme et filonien de Salsigne, Aude. Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E8, 54p.

DARMENDRAIL D., BAIZE D., BARBIER J., FREYSSINET P., MOUVET C., SALPETEUR I., WAVRER D. – Fond géochimique naturel. Etat des connaissances à l'échelle nationale. Rapport BRGM/RP-50518-FR.

DE BLIC P., DELANCE J.H., FLACELIERE G., et al. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 499 Gevrey-Chambertin, BRGM ed., 33p.

DE GROULARD P. (1982) – Etude pétrologique et géochimique d'une série métamorphique à concentration de fer : le groupe des Collobrières, massif des Maures (Var). Thèse, Université Lyon I, 171p.

DEBELMAS J. (1989) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 751 Moûtiers, BRGM ed., 53p.

DEBELMAS J., SHADE J., FABRE J., et al. (1988) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 775 Modane, BRGM ed., 53p.

DELFOUR J., BEURRIER M., TEGYEY M., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 697 Tarare, BRGM ed., 120p.

DEMATTEIS A. (1995) - Typologie géochimique des eaux des aquifères carbonatés des chaînes alpines d'Europe centrale et méridionale. Thèse n°1419, Lausanne, 226p.

DEPREZ N., DURAND M., JURAIN G., et al. (1971) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 375 Plombières-les-Bains, BRGM ed., 14p.

DEROIN J.P., BENOIT P. (1992) – L'ancienne mine d'argent de Pampailly : minéralisation et contexte tectonique d'un gîte filonien dans la série de la Brévenne (Massif Central, France). Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, vol.314, n°12, 1339-1345, 1992.

DDASS de la Haute-Savoie ( ?) – Etude sur l'arsenic, le baryum et l'antimoine dans les eaux de consommation publique. Département de la Haute-Savoie, 13p.

DUBOIS J.D. (1991) – Typologie des aquifères du cristallin : exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc (France, Italie, Suisse). Thèse n°950, EPFL, Lausanne.

DUBOIS J.D., PARRIAUX A. (1990) – Hydrogeological characteristics of cristalline aquifers. Exemple of the Mont Blanc and Aiguilles rouges massifs (France, Italy and Switzerland); first results. Memoires of the 22<sup>nd</sup> Congress of International Association of hydrogeologists, vol.22, 504-513.

DUMOUSSEAU B., JAUDON P., MASSIANI C., et al. (1990) – Origine du manganèse de la nappe alluviale de Beaucaire (Gard, France). Essai de démanganisation in-situ (procédé Vyredox). *Revue des Sciences de l'Eau*, vol.3, 21-36.

EBERENTZ P. (1990) – Mécanisme de la contamination par le Fe et le Mn du forage de Bange à Arcine (74). Rapport BRGM NT 90 RHA 024, 5p.

EBERENTZ P., MARTELAT M. (1988) – Réhabilitation des forages d'exploitation du syndicat intercommunal des eaux de la Sémine à Arsine (74). Rapport BRGM 88 SGN 066 RHA, 22p.

EDYTEM. (2004) – Suivi chimique qualitatif des nappes de l'Arc et de l'Isère. Rapport réalisé pour le Conseil Général de la Savoie, 26p.

ELBAZ-POULICHET F., GARNIER J.M., MARTIN J.M., et al. (1994) – The conservative behaviour of Trace Metals (Cd, Cu, Ni and Pb) and As in the Surface Plume of Stratified Estuaries : Example of the Rhône River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, vol.42, 289-310.

ELBOUCH M. (1996) – Etude physico-chimique des éléments traces (stables et radioactifs) dans les eaux naturelles. Application a eaux du bassin de Lodève (Hérault, France). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Montpellier II, 254 p.

ELLENBERGER F., PLAZIAT J.C., FREZTET P., et al. (1985) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1060 Capendu, BRGM ed., 88p.

ELMI S., BUSNARDO R., CLAVEL B., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 865 Aubenas, BRGM ed., 170p.

ENGREF. (2002) – Problème de l'arsenic dans l'eau potable en Savoie. Phase 1 : Pré-diagnostic. Rapport réalisé pour le Conseil Général de la Savoie.

FERRANDINI J., GRIOLET C. (2000) – Hydrogéologie de la Corse. *Géologues*, vol.125-126, 72.73.

FERRARI C., DOMMERGUE A., VEYSSEYRE A., PLANCHON F., BOUTRON C. (2002) – Mercury speciation in the French seasonal snow cover. *The Science of the Total Environment*, vol.287, 61-69.

FOGLIERINI F., BERNARD A., VERRAES G. (1980a) – Le gisement des Malines (Gard). *Mémoires du BRGM*, n°112, Gisements Français, Fascicule E5, 56p.

FOGLIERINI F., SAMANA J.C., REY M. (1980b) – Le gisement stratiforme de Largentière (Ardèche). *Mémoires du BRGM*, n°112, Gisements Français, Fascicule E4, 54p.

FONTEILLES M., LEBLANC D., CLAUZON G., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1090 Rivesaltes, BRGM ed., 119p.

FUCHS Y. (1976) – A propos de quelques exemples de relations entre altérations et concentrations métallifères (Pb, Zn, Cu, U, Ba, Sr, F...) dans le domaine épicontinental. Bulletin de la Société Géologique de France, vol.18, n°1, 91-94, 1976.

FUDRAL S., DEVILLE E., NICOUD G., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 776 Lanslebourg-Mont-d'Ambin, BRGM ed., 94p.

GEZE B., PALOC H. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 936 Nant, BRGM ed, 51p.

GIDON M., MOULLADE M., MONJUVENT G., et al. (1991) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 893 Laragne-Montéglin, BRGM ed., 84p.

GIDON M., ARNAUD H., BUFFET G., et al. (1980) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 845 Saint-Bonnet, BRGM ed., 43p.

GIDON M., BOGDANOFF S., KERCKHOVE C., et al. (1978) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 896 Larche, BRGM ed., 28p.

GIDON M., BARFETY J.C., et al. (1969) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 749 Montmélian, BRGM ed., 20p.

GONCALVES G. (2003) - Département des Hautes-Alpes. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-52090-FR., 237p.

GONCALVES G. (2001) - Département du Var. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-51151-FR., 318p.

GONCALVES G. (2000a) – Département des Alpes-de-Haute-Provence. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50509-FR., 93p.

GONCALVES G. (2000b) – Département des Bouches du Rhône. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50510-FR., 278p.

GONCALVES G., SOLAGES S. (2000) - Département du Vaucluse. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50142-FR., 115p.

GOUISSET Y., GRAILLAT A. (1985) – Synthèse hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné. Rapport BRGM 86 SGN 016 RHA, 206p.

GRAILLAT A. (1987) – Etude du fer et du manganèse dans les nappes alluviales du bassin Rhône-Méditerranée et Corse. Enquête sur quatre tronçons de vallées du bassin. Rapport BRGM 87 SGN 428 RHA, 32p.

GRAVOST M. (1991) – Source de Font Marignane. Recherche des causes possibles de contamination de la source. Rapport BRGM/RP-32702-FR, 3p.

GROUSSET F.E., QUETEL C.R., THOMAS B., et al. (1995) – Anthropogenic vs. Lithogenic origins of trace elements (As, Cd, Pb, Rb, Sb, Sn, Zn) in water column particles : northwestern Mediterranean Sea. Marine Chemistry, vol.48, 291-310.

GUIEU G., LÖYE-PILOT M.D., MATHELY J.N., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1111 Cervione, BRGM ed., 50p.

GUITARD G., GEYSSANT J., LAUMONIER B., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1095 Prades, BRGM ed., 198p.

HESSKE S., PARRIAUX A., BENSIMON M. (1997) – Geochemistry of springwaters in Molasse aquifers : Typical mineral trace elements. *Ecloga Geologicae Helvetiae*, vol. 90, n°1, 151-171, 1997.

HOLE J.P., GONOD N. (1990) – Schéma départemental d'assainissement de la Drôme. Etat qualitatif de la ressource en eau souterraine. Rapport BRGM/RP-31338-FR, 7p.

HUNEAU F. (2000) – Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Etude géochimique et isotopique du bassin Miocène de Valréas (Sud-Est de la France). Thèse, Université d'Avignon, 191p.

HUYNH-NGOC L., WHITEHEAD N.E., ORGIONI B. (1987) – Cadmium in the Rhône River. *Water Research*, vol. 22, n°5, 571-576.

IRIS Consultants, Conseil général de l'Ardèche, Agence de l'eau RM&C (2002) – Bilan de la qualité des eaux des affluents aval de l'Ardèche en période estivale – année 2001. Rapport d'étude, 9p.

JAUFFREY D. (2001) – L'arsenic dans les eaux de captages d'eau potable du département de la Saône-et-Loire. Répartition géographique et origine. Rapport BRGM/RP-51290-FR, 14p.

JAUZEIN A., LÖYE-PILOT M.D., ORZAG-SPERBER F. (1976) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1119 Ghisonaccia, BRGM ed., 28p.

JAUZEIN A., PERTHUISOT J.P. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 602 Tournus, BRGM ed., 16p.

KERCKHOVE C., ROUIRE J., ROUSSET C., et al. (1983) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 894 Seyne, BRGM ed., 34p.

KERCKHOVE C., ROUX M. (1976) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 971 Castellane, BRGM ed., 39p.

KERCKHOVE C., PAIRIS J.L., PLAN J., SCHNEEGANS D. (1974) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 895 Barcelonnette, BRGM ed., 21p.

KERRIEN Y., TURREL C., MONJUVENTG., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 654 Annemasse, BRGM ed., 130p.

LAHONDERE J.C., CONCHON O., LAHONDERE D. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1107 Vescovato, BRGM ed., 67p.

LAHONDERE J.C. (1983) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1104 Bastia, BRGM ed., 37p.

LANDEL A., ORTELLI L., PERMINGEAT F., PICOT P. (1969) – Sur la minéralisation plombo-zincifère du champ filonien de Vialas (Lozère) : présence de minéraux de tellure, bismuth, d'argent, d'étain, de tungstène et d'or. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, vol.106, n°3-4, 289-302, 1971.

LANTEAUME N. (1991) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 948 Viève-Tende, BRGM ed., 129p.

LAVILLE-TIMSIT L. (1989) – Etude des sols en bordure de la rivière La Ligne, Phase 1 : Synthèse des données existantes. Rapport BRGM 89 SGN 504.

LE FORT P., BIJU-DUVAL J., VERNET J., et al. (1980) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 846 Orcières, BRGM ed., 27p.

LE GUEN M., LANCELOT J.R. (1989) – Origine du Pb-Zn des minéralisations du Bathonien sud-cévenol. Apport de la géochimie isotopique comparée du plomb des galènes, et leur encaissant et du socle. Chronique de la Recherche Minière, n°495, 31-36, 1989.

LEPINE J., TALAYSSAT M., CROUZET J., et al. (1988) – Les minéralisations sulfo-arséniées aurifères cambriennes de la mine traditionnelle de Salsigne (Aude, France). Documents BRGM, vol.158, 627-650.

LONGET A., MADINIER B. (2002) – Aléas liés à l'existence d'anciennes mines de fer sur la commune d'Etupe (Doubs). Rapport BRGM/RP-51345-FR, 17p.

LORENCHET-DE-MONTJAMONT M., TEGYEY A. (1973) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 650 Belleville, BRGM ed., 21p.

MAILLET-GUY G. (1990) – Hydrogéologie du bassin chambérien : un exemple de système aquifère de vallée glaciaire. Annales scientifiques de l'université de Besançon, vol.8.

MANDIA Y. (1991) – Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin Lémanique du Rhône (Alpes occidentales). Thèse n°948, EPFL, Lausanne.

MANIA J., CHAUVE P., REMY F., et al. (1988) – Evolution of Iron and Manganese Concentrations in Presence of Carbonates and Clays in the Alluvial Groundwaters of the Ognon (Franche-Comté, France). Geoderma, vol.44, n°2, 219-227.

MARCOUX E., JOUBERT M., LESCUYER J.L. (1991) – Origine des minéralisations stratiformes de la bordure du Canigou (Pyrénées-orientales, France) : apport de la géochimie isotopique du plomb. Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, vol.312, série 2 : Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre, n°3, 281-287.

MARCOUX E., LESCUYER J.L., MILESI J.P. (1990) – Géochimie isotopique du plomb du gisement de Chessy et des minéralisations volcano-sédimentaires de la série de la Brévenne (Massif Central) : implications métallogéniques et conséquences pour l'exploration. Chronique de la Recherche Minière, n°501, 3-11.

MENNESSIER G., ROSSET F., BELLIERE J., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 703 Saint-Gervais-les-Bains, BRGM ed., 38p.

MEYBECK M. (1984) – Les fleuves et le cycle géochimique des éléments, Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, 456p.

MICHARD A.G. (1990) – Synthèse Montagne Noire. Rapport BRGM/RP-30358-FR, 235p.

MINOUX G., THEOBALD N. (1974) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 374 Monthureux-sur-Saône, BRGM ed., 29p.

Ministère chargé de la Santé (2000) – Les eaux de distribution publique dans le département des Pyrénées Orientales.

NAUD G. (1971) – Contribution à l'Etude Géologique et Hydrogéologique du Massif des Coirons (partie orientale) (Ardèche), Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Montpellier, 153 p, 3 cartes.

NICOLAS J., DE KERSABIEC A.M. (1970) – Dégradation actuelle de la bauxite à mur karstique du Sud-Est de la France. Recherches sur le mode de transport, par les eaux, de l'alumine, du fer et de la silice. Compte Rendus Hebdomadaires des Sciences de l'Académie des Sciences, Série D : Sciences Naturelles, vol.270, n°14, 1739-1742.

PAIRIS J.L., PAIRIS B., BELLIERE J., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 679 Cluses, BRGM ed., 89p.

PANE-ESCRIBE M.B. (1995) – Utilisation des éléments traces comme traceurs des circulations souterraines en milieu karstique (site de Lamalou, Hérault). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Montpellier II, 297 p.

PANE-ESCRIBE M.B. (1997) – Les éléments traces et leur signification dans les eaux karstiques. Hydrogeologia, n°4, 27-32, 1997.

PARRIAUX A. (1997) – The analysis of low concentration mineral traces ; a new tool to determinate the origin of water and its pollution. International Association of Hydrogeological Sciences, vol.244, 125-132.

PETELET-GIRAUD E., NEGREL P., LUCK J.M., BEN OTHMAN D. (2004) – Transport de métaux lourds sous forme particulaire et dissoute dans le bassin versant de l'Hérault : identification des origines par les isotopes du plomb. La Houille Blanche, n°2, 43-48, 2004.

PETELET-GIRAUD E. (1998) – Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eau à moyenne et à petite échelle : les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S.France). Thèse, Université Montpellier II, 512p.

PHILIP H., BODEUR Y., SEGURET M., et al. (1978) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 963 Saint-Martin-de-Londres, BRGM ed., 27p.

PLANCHEREL R., CARON C., BROQUET P. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 655 Samoëns Pas-de-Morgins, BRGM ed., 110p.

RAMPNOUX N., ANCET A., GANGNANT V. (2004) – Suivi qualitatif de la nappe de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes). Rapport BRGM/RP-53113-FR.

Rapport du Ministère chargé de la Santé (2000) – Les eaux de distribution publique dans le département des Pyrénées Orientales.

REMOND C., GUENOT B., BRIOTET H., et al. (1984) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 526 Beaune, BRGM ed., 53p.

ROSSI P., DURAND-DELGA M., LOHONDERE J.C., et al. (2001) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1106 Santo-Pietro-di-Tenda, BRGM ed., 224p.

ROSSI P., DURAND-DELGA M., CARON J.M., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1110 Corte, BRGM ed., 150p.

ROUIRE J., MENNESSIER G., MODRET D., et al. (1979) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1022 Brignoles, BRGM ed., 30p.

ROUIRE J., BLANC J.J., CARON J.P., et al. (1974) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1045 Cuers, BRGM ed., 28p.

ROUIRE J., GOUVERNET C., BLANC J.J., et al. (1969) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1064 Toulon, BRGM ed., 23p.

ROUSSET C. (1967) – Sur la nature et la genèse des minerais de fer du Haut-Var ; leurs relations avec la paléogéographie locale. Rapports et différences avec les formations bauxitiques et les « terra-rossa ». Bulletin de la Société Géologique de France, vol.9, n°4, 640-651, 1968.

SALMINEN R., BATISTA M.J., BIDOVEC M., DEMETRIADES A., DE VIVO B., DE VOS W., DURIS M., GILUCIS A., GREGORAUSKIENE V., HALAMIC J., HEITZMANN P., LIMA A., JORDAN G., KLAVER G, KLEIN P., LIS J., LOCUTURA J., MARSINA K., MAZREKU A., O'CONNOR P.J., OLSSON S.A., OTTESEN R. T., PETERSELL V., PLANT J.A., REEDER S., SALPETEUR I., SANDSTROM H., SIEWERS U., STEENFELT A., TARVEINEN T. (2005) – Geochemical Atlas of Europe. Part 1 – Background information, methodology and maps. 526 p., 36 figures, 362 maps.

SALPETEUR I. (1993) – Synthèse régionale des Pyrénées Orientales. Rapport BRGM/RP-37780-FR.

SAMANA J.C. (1970) – Description et interprétation d'une concentration d'antimoine en milieu lagunaire : l'indice de stibine de Charmes-sur-Rhône. Bulletin du BRGM, Section II, n°2, 11p.

SIDER H., GAGNY C., MOUTERDE R., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 673 Amplepuy, BRGM ed., 81p.

SOULE DE LAFOND D., LHEGU J. (1980) – Les gisements stratiformes de fluorine du Morvan (Sud-Est du bassin de Paris, France). Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E2, 39p.

SUAIS M.F., GADALIA A. (1990) – Réhabilitation de la qualité des eaux de La Ligne à l'Argentière (07). Rapport BRGM/RP-30506-FR.

SUAIS M.F., GOUISSET Y., RAMPON G., et al. (1984) – Photographie de la qualité des eaux brutes des nappes de la région Rhône-Alpes. Rapport BRGM 84 AGI 203 RHA, 30p.

SYLVESTRE J.P. (2000) – Présentation générale de l'hydrogéologie de la région PACA. Géologie, vol.125-126, 63-67.

THEOBALD N., THIEBAUT J., ROSSI M., et al. (1974) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 411 Giromagny, BRGM ed., 23p.

THEOBALD N. (1968) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 410 Luxeuil-les-bains, BRGM ed., 8p.

TOUTIN-MORIN N., CREVOLA G., GIRAUD J.D., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1024 Fréjus-Cannes, BRGM ed., 187p.

TRAVI Y., BLAVOUX B. (2000) – Quelques problèmes hydrogéologiques majeurs dans le département du Vaucluse. Géologues, vol.125-126, 68-71.

TUCKER M.E. (1974) – Ferromanganese nodules from the devonian of the Montagne Noire (S.France) and West Germany. Geologische Rundschau, vol.62, n°1, 137-153.

VALENCIA G. (2000) – Eaux de surface et eaux souterraines en région PACA : une introduction. Géologues, vol.125-126, 61-63, septembre 2000.

VAN DE VELDE K., BARBANTE C., COZZI G., MORET I., BELLOMI T., FERRARI C., BOUTRON C. (2000) – Changes in the occurrence of silver, gold, platinum, palladium and rhodium in Mont Blanc ice and snow since the 18<sup>th</sup> century. Atmospheric Environment, vol.34, n°19, 3317-3327.

VEYSSEYRE A., MOUTARD A., FERRARI C., VAN DE VELDE K., BARBANTE C., COZZI G., CAPODAGLIO G., BOUTRON C. (2001) – Heavy metals in fresh snow collected at different altitudes in the Chamonix and Maurienne valleys, French Alps : initial results. Atmosphere Environnement, vol.35, n°4, 15-25.



## Bibliographie par secteur

### LES ALPES EXTERNES

ANTOINE P., BARBIER R., BARFETY J.C., et al. (1983) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 750 La Rochette, BRGM ed., 45p.

BARDOSSY G. (1997) – Berthier, les Baux et l'histoire de la bauxite. Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, Série II, Sciences de la Terre et des Planètes, vol.324, n°12, 1031-1040.

BARFETY J.C., APRAHAMIAN J., DEBELMAS J., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 821 La Mure, BRGM ed., 98p.

BRGM (1990) – Etude des ressources en eau dans les nappes profondes. Rapport BRGM N 0042 RHA 093.

GIDON M., MOULLADE M., MONJUVENT G., et al. (1991) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 893 Laragne-Montéglin, BRGM ed., 84p.

GIDON M., ARNAUD H., BUFFET G., et al. (1980) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 845 Saint-Bonnet, BRGM ed., 43p.

GIDON M., BARFETY J.C., et al. (1969) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 749 Montmélian, BRGM ed., 20p.

GONCALVES G. (2003) - Département des Hautes-Alpes. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-52090-FR., 237p.

GONCALVES G., SOLAGES S. (2000) - Département du Vaucluse. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50142-FR., 115p.

GOUISSET Y., GRAILLAT A. (1985) – Synthèse hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné. Rapport BRGM 86 SGN 016 RHA, 206p.

HOLE J.P., GONOD N. (1990) – Schéma départemental d'assainissement de la Drôme. Etat qualitatif de la ressource en eau souterraine. Rapport BRGM/RP-31338-FR, 7p.

KERCKHOVE C., ROUIRE J., ROUSSET C., et al. (1983) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 894 Seyne, BRGM ed., 34p.

KERCKHOVE C., ROUX M. (1976) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 971 Castellane, BRGM ed., 39p.

KERCKHOVE C., PAIRIS J.L., PLAN J., SCHNEEGANS D. (1974) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 895 Barcelonnette, BRGM ed., 21p.

KERRIEN Y., TURREL C., MONJUVENTG., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 654 Annemasse, BRGM ed., 130p.

LE FORT P., BIJU-DUVAL J., VERNET J., et al. (1980) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 846 Orcières, BRGM ed., 27p.

MENNESSIER G., ROSSET F., BELLIERE J., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 703 Saint-Gervais-les-Bains, BRGM ed., 38p.

NICOLAS J., DE KERSABIEC A.M. (1970) – Dégradation actuelle de la bauxite à mur karstique du Sud-Est de la France. Recherches sur le mode de transport, par les eaux, de l'alumine, du fer et de la silice. Compte Rendus Hebdomadaires des Sciences de l'Académie des Sciences, Série D : Sciences Naturelles, vol.270, n°14, 1739-1742.

PAIRIS J.L., PAIRIS B., BELLIERE J., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 679 Cluses, BRGM ed., 89p.

PLANCHEREL R., CARON C., BROQUET P. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 655 Samoëns Pas-de-Morgins, BRGM ed., 110p.

RAMPNOUX N., ANCET A., GANGNANT V. (2004) – Suivi qualitatif de la nappe de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes). Rapport BRGM/RP-53113-FR.

ROUIRE J., BLANC J.J., CARON J.P., et al. (1974) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1045 Cuers, BRGM ed., 28p.

ROUSSET C. (1967) – Sur la nature et la genèse des minerais de fer du Haut-Var ; leurs relations avec la paléogéographie locale. Rapports et différences avec les formations bauxitiques et les « terra-rossa ». Bulletin de la Société Géologique de France, vol.9, n°4, 640-651, 1968.

## **LES ALPES INTERNES**

ANTOINE P., BARFETY J.C., VIVIER G., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 727 Bourg-Saint-Maurice, BRGM ed., 120p.

ANTOINE P., BARBIER R., BARFETY J.C., et al. (1983) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 750 La Rochette, BRGM ed., 45p.

ANTOINE P., CORBIN P., OULIANOFF N., et al. (1979) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 704 Mont Blanc, BRGM ed., 22p.

BARBIER R., BARFETY J.C., BORDET P., et al. (1977) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 774 Saint-Jean-de-Maurienne, BRGM ed., 43p.

BARBIER R., BARFETY J.C., BORDET P., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 798 La Grave, BRGM ed., 44p.

BARFETY J.C., LEMOINE M., MERCIER D., et al. (1996) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 823 Briançon, BRGM ed., 180p.

BARFETY J.C., DEBELMAS J., GIDON P., et al. (1984) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 822 Saint-Christophe-en-Oisans, BRGM ed., 64p.

BARFETY J.C., BORDET P., BORNUAT M., et al. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 797 Vizille, BRGM ed., 35p.

BELLIERE J., OULIANOFF N., BARFETY J.C., et al. (1987) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 680 Chamonix, BRGM ed., 39p.

CAMPREDON R., BIJU-DUVAL B., CASTELAIN J., et al. (1980) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 945 Entrevaux, BRGM ed., 18p.

DEBELMAS J. (1989) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 751 Moûtiers, BRGM ed., 53p.

DEBELMAS J., SHADE J., FABRE J., et al. (1988) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 775 Modane, BRGM ed., 53p.

DEMATTEIS A. (1995) - Typologie géochimique des eaux des aquifères carbonatés des chaînes alpines d'Europe centrale et méridionale. Thèse n°1419, Lausanne, 226p.

DDASS de la Haute-Savoie ( ?) – Etude sur l'arsenic, le baryum et l'antimoine dans les eaux de consommation publique. Département de la Haute-Savoie, 13p.

DUBOIS J.D. (1991) – Typologie des aquifères du cristallin : exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc (France, Italie, Suisse). Thèse n°950, EPFL, Lausanne.

DUBOIS J.D., PARRIAUX A. (1990) – Hydrogeological characteristics of cristalline aquifers. Exemple of the Mont Blanc and Aiguilles rouges massifs (France, Italy and Switzerland); first results. Memoires of the 22<sup>nd</sup> Congress of International Association of hydrogeologists, vol.22, 504-513.

EDYTEM. (2004) – Suivi chimique qualitatif des nappes de l'Arc et de l'Isère. Rapport réalisé pour le Conseil Général de la Savoie, 26p.

ENGREF. (2002) – Problème de l'arsenic dans l'eau potable en Savoie. Phase 1 : Pré-diagnostic. Rapport réalisé pour le Conseil Général de la Savoie.

FERRARI C., DOMMERGUE A., VEYSSEYRE A., PLANCHON F., BOUTRON C. (2002) – Mercury speciation in the French seasonal snow cover. The Science of the Total Environnement, vol.287, 61-69.

FUDRAL S., DEVILLE E., NICOUUD G., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 776 Lanslebourg-Mont-d'Ambin, BRGM ed., 94p.

GIDON M., BOGDANOFF S., KERCKHOVE C., et al. (1978) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 896 Larche, BRGM ed., 28p.

LANTEAUME N. (1991) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 948 Viève-Tende, BRGM ed., 129p.

LE FORT P., BIJU-DUVAL J., VERNET J., et al. (1980) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 846 Orcières, BRGM ed., 27p.

MANDIA Y. (1991) – Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin Lémanique du Rhône (Alpes occidentales). Thèse n°948, EPFL, Lausanne.

PAIRIS J.L., PAIRIS B., BELLIERE J., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 679 Cluses, BRGM ed., 89p.

PARRIAUX A. (1997) – The analysis of low concentration mineral traces ; a new tool to determinate the origin of water and its pollution. International Association of Hydrogeological Sciences, vol.244, 125-132.

SUAIS M.F., GOUISSET Y., RAMPON G., et al. (1984) – Photographie de la qualité des eaux brutes des nappes de la région Rhône-Alpes. Rapport BRGM 84 AGI 203 RHA, 30p.

VAN DE VELDE K., BARBANTE C., COZZI G., MORET I., BELLOMI T., FERRARI C., BOUTRON C. (2000) – Changes in the occurrence of silver, gold, platinum, palladium and rhodium in Mont Blanc ice and snow since the 18<sup>th</sup> century. Atmospheric Environment, vol.34, n°19, 3317-3327.

VEYSSEYRE A., MOUTARD A., FERRARI C., VAN DE VELDE K., BARBANTE C., COZZI G., CAPODAGLIO G., BOUTRON C. (2001) – Heavy metals in fresh snow collected at different altitudes in the Chamonix and Maurienne valleys, French Alps : initial results. Atmosphere Environnement, vol.35, n°4, 15-25.

## **LE BASSIN MOLASSIQUE LEMANIQUE**

BAIZE D. (1997) – Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA ed., 408p.

BUATIER C. (1994) – Caractérisation et analyse de la mobilité et de la biodisponibilité du nickel dans les sols agricoles. Le cas du Pays de Gex (Ain). Etude ADEME, 180p.

CELARDIN F., CHATENOUX L., ERSU P. (1989) – Métaux lourds dans les sols du Bassin Genevois. Archives des sciences, Genève, vol.42, 493-498.

CHAROLLAIS J., RUCHAT C., GINET C., et al. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 678 Annecy-Bonneville, BRGM ed., 139p.

EBERENTZ P. (1990) – Mécanisme de la contamination par le Fe et le Mn du forage de Bange à Arcine (74). Rapport BRGM NT 90 RHA 024, 5p.

EBERENTZ P., MARTELAT M. (1988) – Réhabilitation des forages d'exploitation du syndicat intercommunal des eaux de la Sémine à Arsine (74). Rapport BRGM 88 SGN 066 RHA, 22p.

HESSKE S., PARRIAUX A., BENSIMON M. (1997) – Geochemistry of springwaters in Molasse aquifers : Typical mineral trace elements. *Ecloga Geologicae Helveticae*, vol. 90, n°1, 151-171, 1997.

MAILLET-GUY G. (1990) – Hydrogéologie du bassin chambérien : un exemple de système aquifère de vallée glaciaire. *Annales scientifiques de l'université de Besançon*, vol.8.

### **LE BASSINS TERTIAIRES DU SILLON SAONE – RHONE ET BAS DAUPHINE (BRESSE, DOMBES, BAS-DAUPHINE)**

Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse. (1991) – Réseau de surveillance des eaux souterraines dans le département de la Drôme. Synthèse, conclusions et perspectives. 17p.

DE BLIC P., DELANCE J.H., FLACELIERE G., et al. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 499 Gevrey-Chambertin, BRGM ed., 33p.

GOUISSET Y., GRAILLAT A. (1985) – Synthèse hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné. Rapport BRGM 86 SGN 016 RHA, 206p.

JAUZEIN A., PERTHUISOT J.P. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 602 Tournus, BRGM ed., 16p.

### **LES BASSINS TERTIAIRES PROVENÇAUX**

ANCEL A., MOULIN M., RAMPNOUX N. (2004) – Etat des connaissances géologiques structurales et hydrogéologiques du bassin d'Aix-Gardanne. Rapport BRGM/RP-53238-FR, 114p.

BRGM (1999) – Expertise sur les origines de la pollution du forage du C.C.T. de la DRIRE. Rapport BRGM/RP-40659-FR.

GONCALVES G. (2000a) – Département des Alpes-de-Haute-Provence. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50509-FR., 93p.

GONCALVES G. (2000b) – Département des Bouches du Rhône. Inventaire des cavités souterraines (mines et carrières). Rapport BRGM/RP-50510-FR., 278p.

GRAVOST M. (1991) – Source de Font Marignane. Recherche des causes possibles de contamination de la source. Rapport BRGM/RP-32702-FR, 3p.

HUNEAU F. (2000) – Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Etude géochimique et isotopique du bassin Miocène de Valréas (Sud-Est de la France). Thèse, Université d'Avignon, 191p.

SYLVESTRE J.P. (2000) – Présentation générale de l'hydrogéologie de la région PACA. Géologie, vol.125-126, 63-67, septembre 2000.

TRAVI Y., BLAVOUX B. (2000) – Quelques problèmes hydrogéologiques majeurs dans le département du Vaucluse. Géologues, vol.125-126, 68-71, septembre 2000.

## **LA CORSE ALPINE**

BOULADON J., PICOT P. (1968) – Sur la minéralisation en cuivre des ophiolites de Corse, des Alpes françaises et de la Ligurie. Bull. BRGM, série II, n°1, 1968, 24-37.

BRGM (1996) – Pollution par les métaux lourds des eaux destinées à la consommation humaine, étude de la zone à risque potentiel du Cap Corse. Phase I. Rapport BRGM/RP-38649-FR, 15p.

BRGM (1995a) – Pollution par métaux lourds et arsenic des eaux destinées à la consommation humaine, étude méthodologique du bassin versant de la Bravone. Rapport BRGM/RP-38545-FR, 29p.

BRGM (1994) – Risque de pollution par métaux lourds (arsenic) des eaux destinées à la consommation humaine. Identification des zones susceptibles d'être contaminées en liaison avec les indices et travaux miniers en Haute-Corse. Rapport BRGM/RP-38190-FR, 15p.

FERRANDINI J., GRIOLET C. (2000) – Hydrogéologie de la Corse. Géologues, vol.125-126, 72-73.

GUIEU G., LÖYE-PILOT M.D., MATHELY J.N., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1111 Cervione, BRGM ed., 50p.

JAUZEIN A., LÖYE-PILOT M.D., ORZAG-SPERBER F. (1976) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1119 Ghisonaccia, BRGM ed., 28p.

LAHONDERE J.C., CONCHON O., LAHONDERE D. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1107 Vescovato, BRGM ed., 67p.

LAHONDERE J.C. (1983) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1104 Bastia, BRGM ed., 37p.

ROSSI P., DURAND-DELGA M., CARON J.M., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1110 Corte, BRGM ed., 150p.

## **LA CORSE GRANITIQUE ET VOLCANIQUE**

BRGM (1997c) – Les métaux lourds dans les eaux destinées à la consommation humaine. Étude de la zone à risques potentiels de la région Balagne-Filosorma. Rapport BRGM/RP-39511-FR, 10p.

BRGM (1997d) – Métaux lourds en Corse du Sud. Rapport BRGM/RP-39840-FR, 49p.

BRGM (1994) – Risque de pollution par métaux lourds, arsenic, des eaux destinées à la consommation humaine. Identification des zones susceptibles d'être contaminées en liaison avec les indices et travaux miniers en Haute-Corse. Rapport BRGM/RP-38190-FR, 15p.

CONCHON O., GAUTHIER A., MARRE J. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1126 Roccapina, BRGM ed., 47p.

CONCHON O., GAUTHIER A., MARRE J. (1984a) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1123 Sartène, BRGM ed., 62p.

CONCHON O., GAUTHIER A., ROSSI P., et al. (1984b) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1120 Ajaccio, BGRM ed., 44p.

ROSSI P., DURAND-DELGA M., LOHONDERE J.C., et al. (2001) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1106 Santo-Pietro-di-Tenda, BRGM ed., 224p.

## **LA COUVERTURE LANGUEDOCIENNE**

ALABOUVETTE A., PELLET J., ROUIRE J., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 887 Génolhac, BRGM ed., 62p.

ALABOUVETTE B., BODEUR Y., MATTEI J., et al. (1987) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 962 Le Caylar, BRGM ed., 63p.

ARTHAUD F., FEIST R., MEDIONI R., et al. (1982) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 989 Lodève, BRGM ed., 52p.

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995b) – Valorisation de l'inventaire géochimique du département de l'Ardèche. Rapport BRGM/RP-38398-FR, 22p.

BARBIER J., CHERY L. (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. Rapport BRGM/RP-40448-FR, 51p.

BEUCAIRE C., TOULHOAT P. (1987) – Redox chemistry of uranium and iron, radium geochemistry, and uranium isotopes in the groundwater of the Lodeve basin, Massif Central, France. Applied Geochemistry, vol.2, 417-426, 1987.

BENKÖ D., GROS J.J., CHENEVOYM., et al. (1977) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 818 Valence, BGRM ed., 51p.

BERGER G., DEBAT P., DEMANGE M., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1037 Carcassonne, BRGM ed., 78p.

BERGER G., ELMIS S., BROUDER P., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 888 Bessèges, BRGM ed., 115p.

BERGER G., LEFEBVRE A., TURC R., et al. (1978) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 912 Alès, BRGM ed., 58p.

BOULALON J. (1977) – Les gisements de plomb-zinc-argent du Massif central. Bulletin du BRGM, deuxième série, n°2, 67-90, 1977.

ELBOUCH M. (1996) – Etude physico-chimique des éléments traces (stables et radioactifs) dans les eaux naturelles. Application a eaux du bassin de Lodève (Hérault, France). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Montpellier II, 254 p.

FOGLIERINI F., BERNARD A., VERRAES G. (1980a) – Le gisement des Malines (Gard). Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E5, 56p.

FOGLIERINI F., SAMANA J.C., REY M. (1980b) – Le gisement stratiforme de Largentière (Ardèche). Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E4, 54p.

FUCHS Y. (1976) – A propos de quelques exemples de relations entre altérations et concentrations métallifères (Pb, Zn, Cu, U, Ba, Sr, F...) dans le domaine épicontinental. Bulletin de la Société Géologique de France, vol.18, n°1, 91-94, 1976.

LAVILLE-TIMSIT L. (1989) – Etude des sols en bordure de la rivière La Ligne, Phase 1 : Synthèse des données existantes. Rapport BRGM 89 SGN 504.

LE GUEN M., LANCELOT J.R. (1989) – Origine du Pb-Zn des minéralisations du Bathonien sud-cévenol. Apport de la géochimie isotopique comparée du plomb des galènes, et leur encaissant et du socle. Chronique de la Recherche Minière, n°495, 31-36, 1989.

PANE-ESCRIBE M.B. (1995) – Utilisation des éléments traces comme traceurs des circulations souterraines en milieu karstique (site de Lamalou, Hérault). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Montpellier II, 297 p.

PANE-ESCRIBE M.B. (1997) – Les éléments traces et leur signification dans les eaux karstiques. Hydrogeologia, n°4, 27-32, 1997.

PETELET-GIRAUD E., NEGREL P., LUCK J.M., BEN OTHMAN D. (2004) – Transport de métaux lourds sous forme particulaire et dissoute dans le bassin versant de l'Hérault : identification des origines par les isotopes du plomb. La Houille Blanche, n°2, 43-48, 2004.

PETELET-GIRAUD E. (1998) – Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eau à moyenne et à petite échelle : les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S.France). Thèse, Université Montpellier II, 512p.

PHILIP H., BODEUR Y., SEGURET M., et al. (1978) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 963 Saint-Martin-de-Londres, BRGM ed., 27p.

SAMANA J.C. (1970) – Description et interprétation d'une concentration d'antimoine en milieu lagunaire : l'indice de stibine de Charmes-sur-Rhône. Bulletin du BRGM, Section II, n°2, 11p.

SUAIS M.F., GADALIA A. (1990) – Réhabilitation de la qualité des eaux de La Ligne à l'Argentière (07). Rapport BRGM/RP-30506-FR.

## **LE DELTA DU RHONE**

BRGM. (1985) – Surveillance de la qualité des eaux de la nappe de La Crau. Rapport BRGM 85 SGN 234 PAC, 6p.

DUMOUSSEAU B., JAUDON P., MASSIANI C., et al. (1990) – Origine du manganèse de la nappe alluviale de Beaucaire (Gard, France). Essai de démanganisation in-situ (procédé Vyredox). Revue des Sciences de l'Eau, vol.3, 21-36.

ELBAZ-POULICHET F., GARNIER J.M., MARTIN J.M., et al. (1994) – The conservative behaviour of Trace Metals (Cd, Cu, Ni and Pb) and As in the Surface Plume of Stratified Estuaries : Example of the Rhône River (France). Estuarine, Coastal and Shelf Sciences, vol.42, 289-310.

GROUSSET F.E., QUETEL C.R., THOMAS B., et al. (1995) – Anthropogenic vs. Lithogenic origins of trace elements (As, Cd, Pb, Rb, Sb, Sn, Zn) in water column particles : northwestern Mediterranean Sea. Marine Chemistry, vol.48, 291-310.

## **LE JURA**

ATTEIA O., THELIN P., PFEIFER H.R., et al. (1995) – A search for the origin of cadmium in the soil of the Swiss Jura. Geoderma, vol.66, n°3, 149-172.

BRGM (1995b) – Sécurité des anciennes mines de fer d'Ougney (Jura). Rapport BRGM/RP-38577-FR, 16p.

GRAILLAT A. (1987) – Etude du fer et du manganèse dans les nappes alluviales du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Rapport BRGM 87 SGN 428 RHA, 32p.

LONGET A., MADINIER B. (2002) – Aléas liés à l'existence d'anciennes mines de fer sur la commune d'Etupe (Doubs). Rapport BRGM/RP-51345-FR, 17p.

MANIA J., CHAUVE P., REMY F., et al. (1988) – Evolution of Iron and Manganese Concentrations in Presence of Carbonates and Clays in the Alluvial Groundwaters of the Ognon (Franche-Comté, France). Geoderma, vol.44, n°2, 219-227.

## **LE MASSIF CENTRAL**

ALABOUVETTE A., PELLET J., ROUIRE J., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 887 Génolhac, BRGM ed., 62p.

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995a) – Valorisation de l'inventaire géochimique du département de la Loire. Rapport BRGM/RP-38397-FR, 21p.

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995b) – Valorisation de l'inventaire géochimique du département de l'Ardèche. Rapport BRGM/RP-38398-FR, 22p.

BARBIER J., CHERY L. (1997) – Relation entre fond géochimique naturel et teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux. Rapport BRGM/RP-39544-FR, 51p.

BERGER G., ELMI S., BROUDER P., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 888 Bessèges, BRGM ed., 115p.

BOULALON J. (1977) – Les gisements de plomb-zinc-argent du Massif central. Bulletin du BRGM, deuxième série, n°2, 67-90, 1977.

BRGM (1997b) – Valorisation de l'inventaire minier national, cartographie des concentrations en métaux du département du Rhône. Rapport BRGM/RP-39628-FR, 15p.

CHAPAT M., BAYLET R., LOBIER M.C. (1984) – Relations entre agressivité et concentration en plomb, zinc et cuivre dans les eaux de distribution de la Lozère. Techniques et Sciences Municipales, n°2, 73-80.

CHENEVOY M., SAHUC S., SERANO J.J., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 769 Annonay, BRGM ed., 84p.

DELFOUR J., BEURRIER M., TEGYEY M., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 697 Tarare, BRGM ed., 120p.

DEROIN J.P., BENOIT P. (1992) – L'ancienne mine d'argent de Pampailly : minéralisation et contexte tectonique d'un gîte filonien dans la série de la Brévenne (Massif Central, France). Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, vol.314, n°12, 1339-1345, 1992.

GEZE B., PALOC H. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 936 Nant, BRGM ed, 51p.

LANDEL A., ORTELLI L., PERMINGEAT F., PICOT P. (1969) – Sur la minéralisation plombo-zincifère du champ filonien de Vialas (Lozère) : présence de minéraux de tellure, bismuth, d'argent, d'étain, de tungstène et d'or. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, vol.106, n°3-4, 289-302, 1971.

PERICHAUD J.J. (1980) – L'antimoine, ses minerais et ses gisements. Synthèse gîtologique sur les gisements du Massif Central français. Chronique de la recherche minière, n°456, 1980.

PETELET-GIRAUD E. (1998) – Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eau à moyenne et à petite échelle : les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S.France). Thèse, Université Montpellier II, 512p.

SIDER H., GAGNY C., MOUTERDE R., et al. (1988) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 673 Amplepuy, BRGM ed., 81p.

## **LA MONTAGNE NOIRE**

BOULALON J. (1977) – Les gisements de plomb-zinc-argent du Massif central. Bulletin du BRGM, deuxième série, n°2, 67-90, 1977.

CROUZET J., TOLLON F., et al. (1980) – Le gisement stratiforme et filonien de Salsigne, Aude. Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E8, 54p.

LEPINE J., TALAYSSAT M., CROUZET J., et al. (1988) – Les minéralisations sulfo-arséniées aurifères cambriennes de la mine traditionnelle de Salsigne (Aude, France). Documents BRGM, vol.158, 627-650.

MICHARD A.G. (1990) – Synthèse Montagne Noire. Rapport BRGM/RP-30358-FR, 235p.

PETELET-GIRAUD E. (1998) – Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eau à moyenne et à petite échelle : les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S.France). Thèse, Université Montpellier II, 512p.

TUCKER M.E. (1974) – Ferromanganese nodules from the devonian of the Montagne Noire (S.France) and West Germany. Geologische Rundschau, vol.62, n°1, 137-153.

## **LE PLATEAU HAUT-SAONNOIS ET LE MORVAN**

ARENE J., TEGYEY A., GROS Y., et al. (1977) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 624 Cluny, BRGM ed., 40p.

BARBIER J., CHERY L. (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. Rapport BRGM/RP-40448-FR, 51p.

BAIZE D. (1997) – Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA ed., 408p.

CHAUVE P., MANIA J., MIGNOT C., et al. (1986) – Paramètres physico-chimiques, lithologiques et hydrologiques influençant l'évolution dans le temps des teneurs en fer et en manganèse ; critique des résultats obtenus sur des champs expérimentaux de la plaine alluviale de la Saône (Franche-Comté). Journal of Hydrogeology, vol.86, n°3/4, 367-390, 1 octobre 1986.

CHERMETTE A. (1975) – L'ancienne mine de manganèse de Romanèche (Saône-et-loire). Supplément au Bulletin mensuel de la Société Linnéenne de Lyon, 44e année, n°3, mars 1975.

COULON M. (1979) – Milieux de sédimentation, strontium et manganèse dans les calcaires à entroques de Bourgogne (Jurassique moyen). Bulletin de la Société Géologique de France, vol. 21, n°6, 681-685.

DE BLIC P., DELANCE J.H., FLACELIERE G., et al. (1972) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 499 Gevrey-Chambertin, BRGM ed., 33p.

DEPREZ N., DURAND M., JURAIN G., et al. (1971) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 375 Plombières-les-Bains, BRGM ed., 14p.

JAUFFREY D. (2001) – L'arsenic dans les eaux de captages d'eau potable du département de la Saône-et-Loire. Répartition géographique et origine. Rapport/BRGM RP-51290-FR, 14p.

LORENCHET-DE-MONTJAMONT M., TEGYEY A. (1973) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 650 Belleville, BRGM ed., 21p.

REMOND C., GUENOT B., BRIOTET H., et al. (1984) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 526 Beaune, BRGM ed., 53p.

SOULE DE LAFOND D., LHEGU J. (1980) – Les gisements stratiformes de fluorine du Morvan (Sud-Est du bassin de Paris, France). Mémoires du BRGM, n°112, Gisements Français, Fascicule E2, 39p.

THEOBALD N. (1968) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 410 Luxeuil-les-bains, BRGM ed., 8p.

## **LES PYRENEES**

BERGER G., ALABOUVETTE B., BESSIERE G., et al. (1997) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1078 Tuchan, BRGM ed., 113p.

ELLENBERGER F., PLAZIAT J.C., FREZTET P., et al. (1985) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1060 Capendu, BRGM ed., 88p.

FONTEILLES M., LEBLANC D., CLAUZON G., et al. (1993) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1090 Rivesaltes, BRGM ed., 119p.

GUITARD G., GEYSSANT J., LAUMONIER B., et al. (1998) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1095 Prades, BRGM ed., 198p.

MARCOUX E., JOUBERT M., LESCUYER J.L. (1991) – Origine des minéralisations stratiformes de la bordure du Canigou (Pyrénées-orientales, France) : apport de la géochimie isotopique du plomb. Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, vol.312, série 2 : Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre, n°3, 281-287.

Ministère chargé de la Santé (2000) – Les eaux de distribution publique dans le département des Pyrénées Orientales.

SALPETEUR I. (1993) – Synthèse régionale des Pyrénées Orientales. Rapport BRGM/RP-37780-FR.

## **LES VALLEES DU RHONE ET DE LA SAONE**

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1999) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1999. Rapport ANTEA n°A18296, 129p.

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1997) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1997. Rapport ANTEA n°A11318, 165p.

ANTEA Agence Rhône-Alpes. (1995) – Surveillance de la qualité physico-chimique de la nappe alluviale de la Z.I. Au Sud de Lyon (69). Résultat des mesures 1995. Rapport ANTEA n°A04372, 133p.

BUSSE J.F. (1980) – La pollution dans la nappe des formations quaternaires de l'Est de Lyon (France). Thèse, université de Grenoble.

GRAILLAT A. (1987) – Etude du fer et du manganèse dans les nappes alluviales du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Enquête sur quatre tronçons de vallées du bassin. Rapport BRGM 87 SGN 428 RHA, 32p.

HUYNH-NGOC L., WHITEHEAD N.E., ORGIONI B. (1987) – Cadmium in the Rhône River. Water Research, vol. 22, n°5, 571-576.

TRAVI Y., BLAVOUX B. (2000) – Quelques problèmes hydrogéologiques majeurs dans le département du Vaucluse. Géologues, vol.125-126, 68-71.

VALENCIA G. (2000) – Eaux de surface et eaux souterraines en région PACA : une introduction. Géologues, vol.125-126, 61-63.

## **LES MAURES ET L'ESTEREL**

AICARD P., CAIA J., PERONNE Y., et al. (1974) – District filonien (fluor, baryum, plomb et zinc) des Maures orientales. Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, n°2, 1p.

BORDET P., CHAMLEY H., BLANC J.J., et al. (1976) – Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1065-1080 Hyères-Porquerolles, BRGM ed., 21p.

DE GROULARD P. (1982) – Etude pétrologique et géochimique d'une série métamorphique à concentration de fer : le groupe des Collobrières, massif des Maures (Var). Thèse, Université Lyon I, 171p.

ROUIRE J., GOUVERNET C., BLANC J.J., et al. (1969) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1064 Toulon, BRGM ed., 23p.

TOUTIN-MORIN N., CREVOLA G., GIRAUD J.D., et al. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 1024 Fréjus-Cannes, BRGM ed., 187p.

## **LE VOLCANISME DES COIRONS**

BLUM A., CHERY L., BARBIER J., BAUDRY D., PETELET-GIRAUD E. (2002) – Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport BRGM/RP-51549-FR.

BRGM (2005) – Qualité naturelle des eaux souterraines : Méthodologie et caractérisation des états de références des aquifères français, Collections Techniques, à paraître. BRGM ed.

NAUD G. (1971) – Contribution à l'Etude Géologique et Hydrogéologique du Massif des Coirons (partie orientale) (Ardèche), Thèse de 3ème cycle, Université Montpellier, 153 p, 3 cartes.

ELMI S., BUSNARDO R., CLAVEL B., et al. (1989) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 865 Aubenas, BRGM ed., 170p.

## **LES VOSGES**

BRGM (1997a) – Cartographie des concentrations et des fonds géochimiques métalliques connues du massif des Vosges. Rapport BRGM/RP-39979-FR, 21p.

DARMENDRAIL D., BAIZE D., BARBIER J., FREYSSINET P., MOUVET C., SALPETEUR I., WAVRER D. – Fond géochimique naturel. Etat des connaissances à l'échelle nationale. Rapport BRGM/RP-50518-FR.

COULON M., PAICHELER J.C., GUERIN H. (1986) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 412 Thann, BRGM ed., 137p.

THEOBALD N., THIEBAUT J., ROSSI M., et al. (1974) - Carte géologique de la France à 1/50000, feuille 411 Giromagny, BRGM ed., 23p.



**Centre scientifique et technique  
Service EAU/GRI**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34