

135<sup>e</sup> Année - N°2 - 2<sup>e</sup> Trimestre 1998 - ISSN 0032-7875

---

# LA PRESSE THERMALE et CLIMATIQUE

---

Les ressources hydrominérales  
du bassin de Paris

**Organe officiel de la Société Française  
d'Hydrologie et de Climatologie Médicales**

---

 Expansion Scientific Publications

# La Presse Thermale et Climatique

ORGANE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'HYDROLOGIE  
ET DE CLIMATOLOGIE MÉDICALES

Ancienne GAZETTE DES EAUX

Fondateur : Victor GARDETTE †

## COMITÉ DE PATRONAGE

Professeur F. BESANÇON. – Professeur M. BOULANGÉ. – Doyen G. CABANEL. – J. CHAREIRE †. – Professeur CORNET. – Professeur Agrégé V. COTLENKO †. – A. DEBIDOUR. – Professeur C. DELBOY. – Professeur Y. DENARD. – Professeur P. DESGREZ. – Professeur J.J. DUBARRY †. – Professeur P. DUCHÊNE-MARULLAZ. – R. FLURIN. – Professeur L. JUSTIN-BESANÇON †, Membre de l'Académie de Médecine. – Professeur Cl. LAROCHE. – Professeur J. PACCALIN. – J. PASSA – Doyen P. QUENEAU.

## COMITÉ DE RÉDACTION

**Rédacteur en chef honoraire** : Jean COTTET, membre de l'Académie de Médecine.

**Rédacteur en chef** : J. FRANÇON. **Secrétaire de Rédaction** : R. CHAMBON.

**Allergologie** : P. FLEURY, M. FOUROT-BAUZON. – **Bioclimatologie-Environnement** : J.P. BESANCENOT. – **Biologie** : S. GUILLEMANT, J. MÉCHIN. – **Cardiologie et Angéiologie** : C. AMBROSI, J. BERTHIER, Pr P. CARPENTIER, R. CHAMBON. – **Dermatologie** : J.M. AUGÉ, P.L. DELAIRE, J.-M. SONNECK. – **Etudes hydrologiques et thermales** : R. LAUGIER, B. NINARD, G. POPOFF. – **Gynécologie** : Ch. ALTHOFFER-STARCK. – **Hépatologie et Gastro-entérologie** : J.B. CHAREYRAS, Cl. LOISY †. – **Néphrologie et Urologie** : J.M. BENOIT, J. THOMAS. – **Neurologie** : J.P. CAMBIERE. – **Nutrition** : A. ALLAND, P. JEAMBRUN. – **Pathologie ostéo-articulaire** : F. FORESTIER, A. FRANÇON, D. HOURS, R. LOUIS. – **Pédiatrie** : J.L. FAUQUERT, R. JEAN. – **Psychiatrie** : O. DUBOIS, L. VIDART. – **Rééducation fonctionnelle** : A. AUTHIER, A. MONROCHE. – **Voies respiratoires** : C. BOUSSAGOL, J.F. LEVENEZ. – **Stomatologie** : Ph. VERGNES. – **Thermalisme social** : P. BRILLAT, G. FOUCHÉ.

## COMITÉ MÉDICAL DES STATIONS THERMALES

Docteurs A. DELABROISE, G. EBRARD, C.Y. GERBAULET, B. GRABER-DUVERNAY, J. LACARIN.

*Les opinions exprimées dans les articles ou reproduites dans les analyses n'engagent que les auteurs.  
« Aucun article ou résumé d'article, publié dans cette revue ne peut être reproduit sous forme d'imprimés, photocopie, microfilm ou par autre procédé, sans l'autorisation expresse des auteurs et de l'éditeur ».*

© Expansion Scientifique Publications, 1998

## Éditeur : EXPANSION SCIENTIFIQUE PUBLICATIONS

Rédaction : 31, boulevard de Latour-Maubourg – 75343 PARIS CEDEX 07

Tél. 01.40.62.64.00, Télécopie 01.45.55.69.20 – C.C.P. 370-70 Paris

Administration-Abonnements-Publicité : 15, rue Saint-Benoît – 75278 PARIS CEDEX 06

Tél. 01.45.48.42.60, Télécopie 01.45.44.81.55

### TARIFS DE L'ABONNEMENT

4 numéros par an

FRANCE : 520 F ; Etudiants, CES : 260 F

ETRANGER : 680 F ; Etudiants, CES : 340 F

Prix du numéro : 170 F



SYNDICAT NATIONAL  
DE LA PRESSE MÉDICALE

# La Presse Thermale et Climatique

## SOMMAIRE

### LES RESSOURCES HYDROMINÉRALES DU BASSIN DE PARIS

F. Dupuy, M.I. Gesteau-Auriol, R. Laugier, L. Louveau, E. Tisserand

#### 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> parties

Avant-propos .....	75
--------------------	----

#### I. – CHRONOSTRATIGRAPHIE

##### Brève histoire du bassin de Paris racontée aux médecins thermaux

##### Généralités :

Relations interplaques .....	77
Le rift planétaire .....	78
Structure du bassin parisien .....	79

##### Naissance - Croissance - Extinction d'un bassin sédimentaire :

L'ère primaire .....	86
L'ère secondaire .....	86
L'ère tertiaire .....	91
Paléographie : Fini-Crétacé – Actuel .....	92

#### II. – LES AQUIFÈRES DU BASSIN DE PARIS DANS LEURS RAPPORTS AVEC LE LABEL EAU MINÉRALE ET EAU THERMALE

Réservoirs primaires .....	95
Réservoirs triasiques .....	101
Réservoirs jurassiques .....	116
Ressources aquifères du Crétacé inférieur .....	118
Le Crétacé supérieur .....	119
L'Aquifère éocène .....	122
Bibliographie .....	135

Les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> parties consacrées à *Enghien-les-Bains dans son contexte structural et à l'Étude des composés soufrés. Application aux eaux minérales d'Enghien-les-Bains*, paraîtront dans le N° 4/1998 de la Revue.

Informations .....	94
Un ami nous a quittés .....	94

# La Presse Thermale et Climatique

1998, 135, n° 2, 73-136

## CONTENTS

### HYDROMINERAL RESSOURCES OF THE PARIS BASIN

F. Dupuy, M.I. Gesteau-Auriol, R. Laugier, L. Louveau, E. Tisserand

#### Parts 1 and 2

Foreword ..... 75

#### I. – CHRONOSTRATIGRAPHY

##### A short history of the Paris basin as told to spa physicians

##### General remarks:

Interplate relations ..... 77

The planetary rift ..... 78

Structure of the Paris basin ..... 79

##### Birth - Growth - Extinction of a sedimentary basin:

The primary era ..... 86

The secondary era ..... 86

The tertiary era ..... 91

**Paleogeography:** End-Cretaceous – Present ..... 92

#### II. – Aquifers of the Paris basin in terms of their relations with mineral water and spa water labels

Primary reservoirs ..... 95

Triassic reservoirs ..... 101

Jurassic reservoirs ..... 116

Aquifer resources of the lower Cretaceous ..... 118

The upper Cretaceous ..... 119

The eocene aquifer ..... 122

References ..... 135

Parts 3 and 4 devoted to *Enghien-les-Bains in its structural context and the Thermodynamics of the water/sulfur system* will appear in N° 4 of the Revue.

News ..... 94

In Memoriam ..... 94

# LES RESSOURCES HYDROMINÉRALES DU BASSIN DE PARIS

F. DUPUY \*, M.I. GESTEAU-AURIOL \*\*,  
L. LOUVEAU \*\*, E. TISSERAND \*\*  
sous la direction de R. LAUGIER \*\*

## Avant-propos

Présenter les ressources en eaux minérales du bassin parisien pourrait se résumer à une courte énumération adossée aux formulations traditionnelles qui ont contribué à l'infortune du Thermalisme.

En acceptant ce challenge, nous ferons précéder l'inventaire par l'évocation des événements locaux, régionaux et planétaires qui ont contribué dans leurs rôles respectifs à donner au bassin une morphologie dont l'Île-de-France est l'ombilic.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, la Géologie prend ses distances avec les cabinets royaux de curiosité. La Société Géologique de France est fondée en 1830 ; l'Association Française pour l'Avancement des Sciences, par Claude Bernard en 1834. Cette époque est consacrée aux inventaires et aux descriptions : la France offre au monde une échelle chronostratigraphique universelle. La première carte géologique est éditée à Paris en 1889.

À l'occasion de la reconstruction des régions sinistrées par le second conflit mondial, la réglementation

donne plus de poids à l'intervention du Géologue dans le captage des eaux souterraines.

La prospection systématique des bassins sédimentaires en vue de la recherche d'éventuelles réserves d'hydrocarbures modifie complètement le paysage hydrologique : peu de pétrole, mais beaucoup d'eau. Les nappes profondes font l'objet d'études hydrauliques que seuls des industriels puissamment équipés peuvent entreprendre.

Lorsque la confidentialité des explorations est levée, il est permis aux universitaires d'accéder à une vision tridimensionnelle du bassin parisien. Mais ce progrès, bien que considérable, reste limité aux formations suspectées de contenir des hydrocarbures.

Au cours des années 80, l'exploitation de l'énergie géothermique a permis d'aller au-delà : atteindre le socle cristallin, compléter les informations.

Au terme de ce préambule que d'aucuns trouveront trop long, nous voudrions sensibiliser la fraction du corps médical quotidiennement confrontée à la prescription des eaux minérales. Il s'agit moins de Géologie proprement dite, que de fluides à l'équilibre thermodynamique et géochimique dans leur roche magasin. Toute dérive de ces deux paramètres entraîne une modification de leur géochimie et par là de leur pharmacodynamie.

\* Université Saint-Louis, Institut Albert de Lapparent, 95020 CERGY.

\*\* Professeur honoraire des Universités. IRTHERME, 87, avenue du Général de Gaulle, 95880 ENGHUEN-LES-BAINS.

**Remerciements :**

Nous sommes reconnaissants aux personnes, sociétés et collectivités territoriales qui nous ont apporté un estimable concours à l'occasion de la préparation de ce mémoire et notamment à :

- l'Université Saint-Louis,
- l'École Supérieure de Chimie Organique et Minérale (ESCOM),
- l'Institut Albert de Lapparent (IGAL).

Sur les sites de Contrexéville et de Vittel : Mme F. de Buchy, directrice des laboratoires de contrôle et de recherches de Nestlé-France.

Philippe Dague, docteur en géologie.

**RESUME**

Les auteurs proposent d'abord un court survol des unités stratigraphiques du bassin de Paris pris dans son acception la plus large. Ils passent ensuite en revue les sources qui ont reçu le label « minérale », qu'elles soient géothermales ou non. Ils procèdent à une relecture des analyses physico-chimiques anciennes, prennent en compte le gaz carbonique libre écarté des bilans au profit d'une classification arbitraire. Le rôle du socle cristallin dans la remontée des eaux profondes, sa participation à la minéralisation qui est polygénique, est mis en évidence. L'hypothèse qui créditait la poussée orogénique alpine de l'origine des plis de couverture est abandonnée au bénéfice de retouches subies par la vieille structure hercynienne soumise aux déformations de la néo-tectonique. Le mode de raisonnement professé depuis 1/2 siècle est confirmé de façon éclatante : il débouche sur une modélisation hydrogéochimique propre à la localité d'Enghien-les-Bains, applicable dans tout le bassin à condition de respecter les détails structuraux spécifiques de chaque point d'émergence.

**Mots clés :** Bassin de Paris - Eaux minérales - Eaux géothermales - Sulfuration - Hydrogène sulfuré - Polysulfures - Thiols - Thiosulfates - Sulfites - Sulfides - Chlorure mercurique - Nitrate d'argent - Dénaturation - Gaz carbonique - Corrosion - Karstification - Lignites.

**ANALYSE**

La première partie de ce travail, destiné essentiellement aux prescripteurs est le *vade mecum* dont tout médecin devrait disposer à titre de référence, pour sa documentation personnelle. Certaines images de la constitution du bassin de Paris et de son dispositif hydrologique bien que désuètes sont rappelées en raison de leur persistance ; cette démarche est engagée pour mieux extirper les contre-vérités qui ont encore cours. La seconde partie est une revue des ressources hydrominérales, géothermales ou non. Nombre de sources aujourd'hui délaissées prennent un relief particulier. Leurs caractères analytiques révèlent la complexité de la structure de leur aire d'émergence. Les sources ferrugineuses sont particulièrement concernées, le fer étant d'origine très profonde, et le griffon colonisé par des siderobactéries mucilanogènes. La troisième partie est consacrée à l'étude de la structure de l'Ile-de-France, aux failles majeures et à leur cortège, à l'alignement de sources sulfurées le long d'un profil de 135 km dont Enghien-les-Bains n'est qu'un jalon, même si la nature a voulu que ce soit le point le plus remarquable. Les cartes structurales au toit et mur du Sparnacien, la carte d'isopaches révèlent la fosse subsidente d'Enghien, la plus profonde du bassin. La quatrième partie est consacrée à l'analyse. Il se confirme que le soufre se répartit entre ses formes minérales et organiques. La méthode électrométrique est impuissante à titrer certaines espèces soufrées ; nous proposons d'utiliser le nitrate d'argent comme titrant. La structure moléculaire des thiols fait l'objet d'une étude séparée. Il se confirme que la composition des eaux d'Enghien est polygénique : carbo-gazeuse, bicarbonique, sulfatée, d'une part, sulfurée d'autre part.

**SUMMARY**

The authors first provide a brief overview of the stratigraphic units of the Paris basin taken in the broadest possible sense. They then review springs approved to use of the term « mineral », whether geothermal or not. They review old physical chemical analyses, taking into account free carbon dioxide omitted from assessments in favor of an arbitrary classification. The role of the crystalline shelf in the rise of deep waters and its participation in mineralization, which is polygenic, is shown. The hypothesis crediting the alpine orogenic upheaval as the origin of covering folds is abandoned in favor of alterations to the old hercynian structure subjected to neotectonic deformities. The method of reasoning professed for half a century is strikingly confirmed, leading to a hydrogeochemical model specific to the site of Enghien-les-Bains, applicable to the entire basin provided that structural details specific to each point of emergence are taken into account.

**Key words :** Paris basin - Mineral waters - Geothermal waters - Sulfuration - Hydrogen sulfide - Polysulfides - Thiols - Thiosulfates - Sulfites - Sulfides - Mercuric chloride - Silver nitrate - Denaturation - Carbon dioxide - Corrosion - Karsification - Lignites.

**ANALYSIS**

The first part of this article, aimed essentially at prescribers, is the *vade me cum* which all physicians should have as a reference, as part of their personal library. Certain images of the formation of the Paris basin and its hydrological system are reviewed even though outdated, because of their persistence. This approach is adopted with the aim of better extirpating counter-truths which are still current. The second part is a review of hydromineral resources, geothermal or not. Many springs disregarded today take on special significance. Their analytical characteristics reveal the complexity of the structure of their area of emergence. Ferruginous springs are particularly concerned, iron being of very deep origin, and the griffin colonized by mucilanogenic siderobacteria. The third part is devoted to study of the structure of the Ile-de-France, with major faults and their corollaries, the alignment of sulfur springs 135 km long, of which Enghien-les-Bains is only one post, even if nature is such that it is the most noticeable site. Structural maps on the roof and wall of the Sparnacius and the isopaque map reveal the subsiding trench of Enghien, the deepest of the basin. The fourth part concerns analysis. It is confirmed that sulfur is distributed between its mineral and organic forms. The electrometric method is incapable of titrating certain sulfur types. The use of silver nitrate as a titrant is suggested. The molecular structure of thiols is studied separately. It is confirmed that Enghien waters are polygenic: carbogaseous, bicarbonic and sulfated on the one hand, and sulfurated on the other hand.

# I

## CHRONOSTRATIGRAPHIE

### Brève histoire du bassin de Paris racontée aux médecins thermaux

#### GENERALITES

Évoquer la structure du bassin de Paris est une entreprise difficile ; elle exige une concession spontanée du lecteur : entrer dans le jeu sans réticence.

Il est impératif, pour un Géologue qui doit explorer un point précis, de le cadrer à l'intérieur du périmètre élargi dans lequel il s'intègre.

Tracer le cadre oblige à en sortir, se pencher, observer alentour. Ainsi, de proche en proche, nous finirions par faire le tour de la planète, et c'est précisément à une telle excursion que chacun de vous est invité.

#### Relations interplaques

Le continent africain est la clé des plaques et groupements de plaques qui le jouxtent parce qu'il se classe parmi les plus grands, parce qu'il offre le plus d'inertie, parce qu'il donne le « la ».

L'Afrique s'appuie sur l'ensemble continental nord-européen en plusieurs points : Gibraltar, Iles Eoliennes, mer Egée, corne de l'Afrique.

L'Afrique est animée d'un mouvement de balancier (fig. 1) :

– *compression orientée à l'ouest ?*

Elle pousse la plaque ibérique qui répercute les tensions en chevauchant la fosse nord-pyrénéenne, provoquant quelques faux-plis d'orientation ouest-est, tels que :

– synclinal écrasé Décizes-Autun-Epinac ;

– activation de la faille Langres-Vesoul dont le rejet dépasse localement 1 000 m : Rhétien contre Jurassique terminal ;

– faille dite de Vittel ;

– alignement de pointements éruptifs (basanite), Thélod, Essey-la-Côte, le Cerisier noir, Valtin, Ribeauvillé, Kayserstul et jusqu'au Bodensee ;

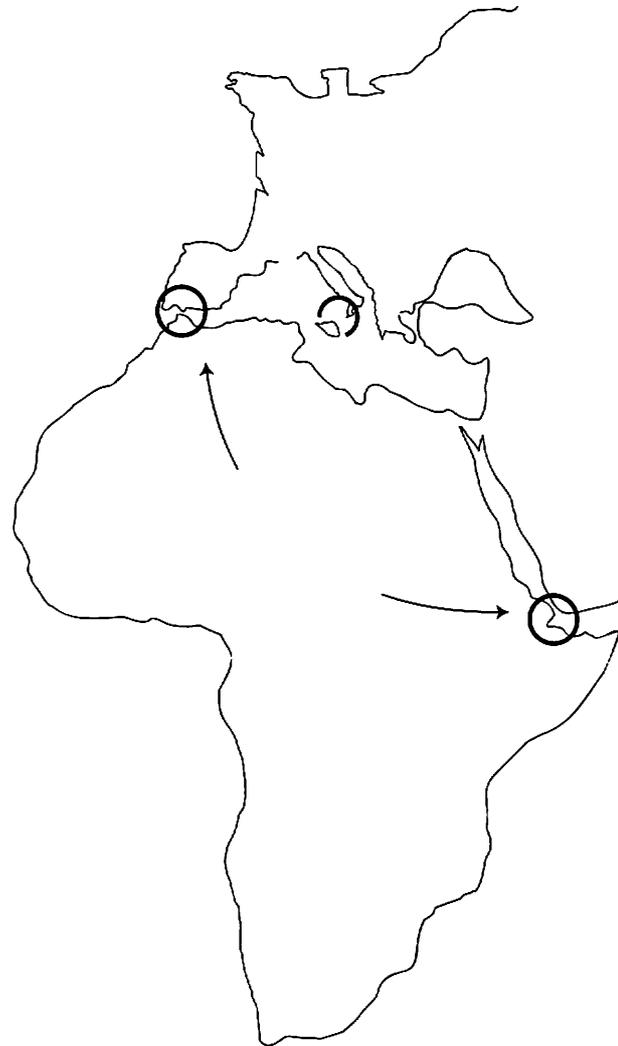


Fig. 1. – Points d'appui de la plaque Afrique sur le complexe européen et la plaque arabe.

– *compression orientée à l'Est ?*

Une coulée de lave attendue à l'heure dite s'épanche en Ethiopie ; des équipes internationales assistent au phénomène (1970) calculé dans ses moindres détails.



Fig. 2. - Le rift transcontinental s'enracine dans l'aire de disjonction ouverte entre Madagascar et l'Afrique qu'il traverse, de Tripoli à Agde, puis jusqu'à Stockholm. La plaque continentale hercynienne est jalonnée par des arrachements latéraux considérables, favorables à l'émergence des aquifères profonds.

### Le rift planétaire

À l'époque au cours de laquelle nous avons reçu notre initiation aux Sciences de la Terre, l'Afrique était considérée comme un continent ayant échappé à tous les efforts de plissements, sa frange numidienne exceptée.

Les travaux d'exploitation minière et pétrolière ont totalement démenti ces certitudes.

Aujourd'hui, nous pouvons considérer que ce vaste continent est fracturé au niveau des Grands Lacs. Ce n'est pas d'une simple faille dont il s'agit, mais bien d'une déchirure profonde qui a permis aux deux unités ainsi initiées d'évoluer chacune de son côté (fig. 2).

Le rift (fossé d'effondrement) des Grands Lacs est à l'origine d'une balafre d'importance planétaire. Celle-ci a pré-dessiné les vallées des deux Nils, ouvert les fossés libyens, relevé le mur de Malte, creusé le détroit de Messine. Relayé par les fossés tunisiens, le

rift aborde le littoral français par le fossé d'Agde. Il s'incline alors et se prolonge par le fossé d'Alès (fig. 3), étroite déchirure de 11 à 15 km de large, profonde de plus de 5 000 m.

Le fossé du Dauphiné, récemment mis en place, suivi par le fossé de Bresse encore inconnu dans les années 60, prend le relais de la plaine d'Alsace et de Bade qui correspondent au rift rhénan.

La traversée des Massifs schisteux se fait par un étroit défilé : *la percée héroïque*, puis le rift s'individualise sur le site complexe des bouches communes au Rhin, l'Escaut et la Meuse.

L'itinéraire se termine dans le fjord de Stockholm après la traversée de la mer du Nord (fig. 4).

On conçoit mieux le rôle que vont jouer les contours orientaux du bassin parisien confronté aux frémissements d'une architecture aussi gigantesque, à l'intérieur de laquelle tout bouge [5] et dérange les structures de proximité.

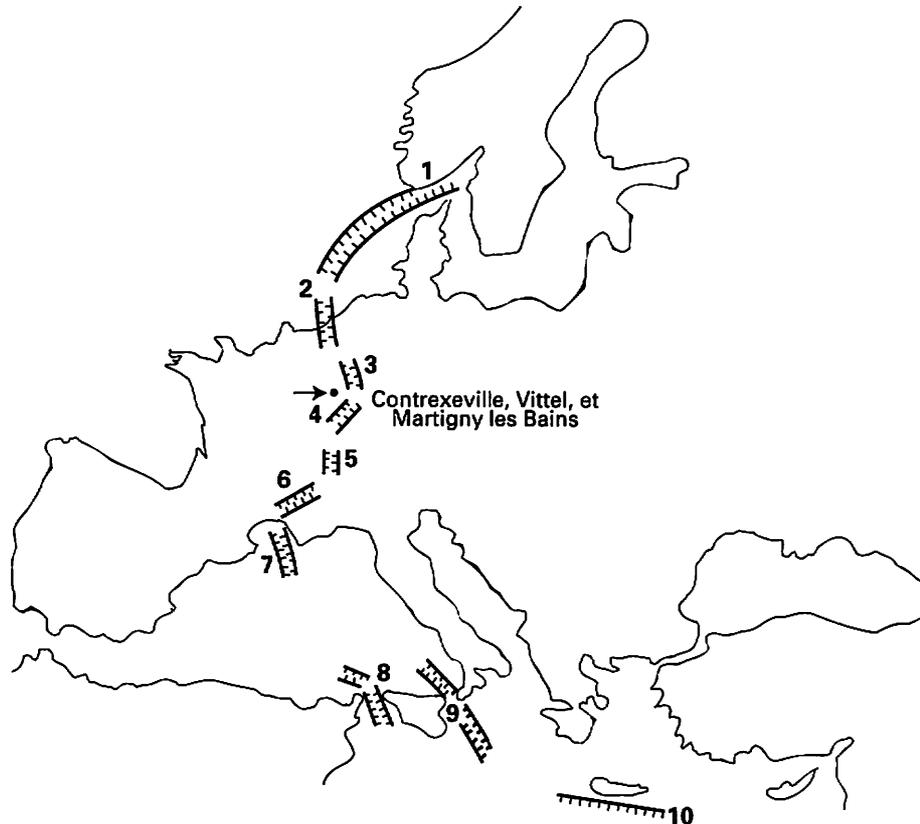


Fig.3A. - Le rift planétaire du Nord au Sud. 1) Le fjord de Stockholm. 2) Les bouches du Rhin-Escaut-Meuse-Tamise. 3) Le fossé alsacien. 4) La Bresse. 5) Le fossé du Dauphiné. 6) Le fossé d'Alès. 7) Le fossé d'Agde. 8) Les fossés tunisiens. 9) Le détroit de Messine. 10) Le mur de Malte.

### Structure du bassin parisien

L'architecture du bassin de Paris comprend 3 éléments ; ce sont de haut en bas :

- 1) remplissage sédimentaire complexe, d'âge secondaire, puis tertiaire,
- 2) croûte granitique primaire, son remplissage calcaire marmorisé, ses argiles, transformées en schistes, les sables grésifiés, les gîtes charbonniers,
- 3) reliques éparpillées d'une croûte antécambrienne

#### Période antécambrienne

Les événements qui ont eu lieu *avant* le début de l'ère primaire sont généralement réunis sous le qualificatif d'antécambriens.

Ce terme désigne des roches dont l'histoire ne peut se lire facilement faute de traces de vie permettant une datation.

Devant cette difficulté, d'autres méthodes sont mises en œuvre : isotopie et géochimie.

De la croûte primitive, il ne subsiste plus sur notre territoire que des lambeaux méconnaissables, métamorphisés à plusieurs reprises. Finistère, Massif central, Pyrénées, Val-de-Villé dans les Vosges, offrent de telles reliques. Celles-ci ne présentent pas un réel intérêt envers le thème que nous traiterons dans ce travail.

#### Période hercynienne

Les plissements hercyniens se sont déployés en plusieurs phases. Nous distinguons traditionnellement :

- les plis de **direction armoricaine** (fig. 5) alignés d'ouest en est, balayant la Cornouaille, la Bretagne et le Cotentin [9], ennoyés sous les sédiments pour réapparaître au rebord de l'un des massifs schisteux rhénans : l'Ardenne ;
- les autres plis hercyniens sont disposés en V. Ce sont des géologues allemands qui, les premiers, ont définie la warische Richtung, **direction varisque** comprenant deux branches :

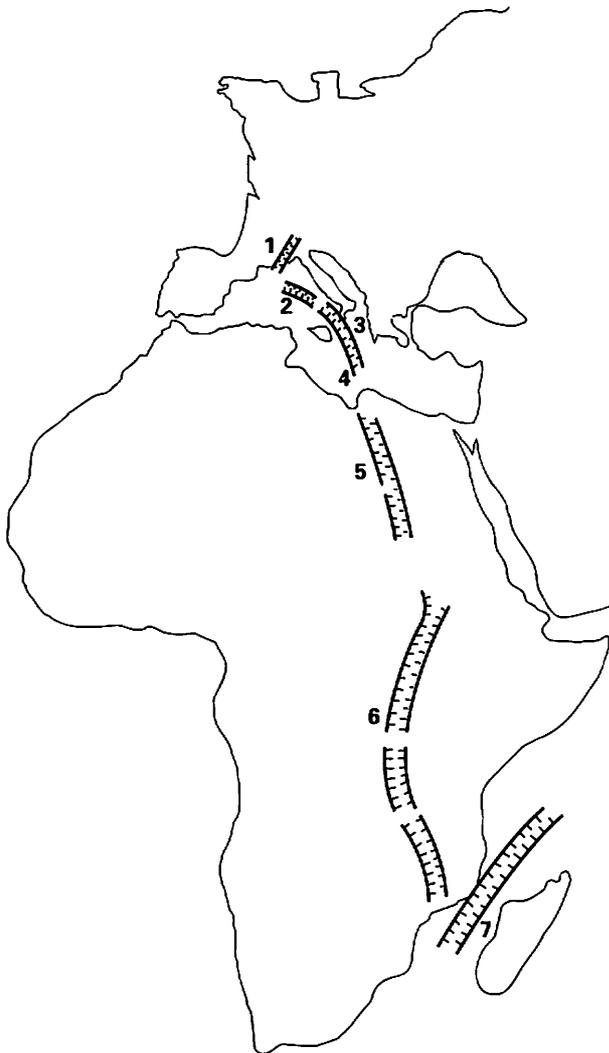


Fig. 3B. – Le rift planétaire en Afrique. Du Nord vers le Sud : 1) Fossé d'Alès ; 2) Fossé sarde ; 3) Charybde et Scylla ; 4) Fossés lybiens ; 5) Rift du Nil ; 6) Rift des grands Lacs ; 7) Rift de Mozambique.

– l'orientation de la première est : NW-SE. Les plis partent de la baie de Brest, descendent jusqu'à Aurillac où ils sont marqués par un rebroussement brutal dans un périmètre très tourmenté ;

– l'orientation de la seconde branche est : SW-NE. Elle comprend le sillon houiller, dénomination attribuée en raison de l'alignement sur son parcours de plus de 15 petits gisements charbonniers. La structure se suit aisément d'Aurillac au Creusot ; elle concerne tous les chaînons qui ont la même orientation : N-20°E. Au Nord du Morvan, deux branches s'individualisent : l'une relie Autun au massif de la Serre et à Luxeuil, l'autre comprend plusieurs axes qui se réunissent à Essey la Côte et rejoignent Bäerenthal au Nord de Strasbourg.

Les plis du V varisque **défilent** devant les Vosges [33], ils forment le tréfond de la plaine lorraine ; la structure nommée seuil morvano-vosgien est différente [48]. Il est temps de ne plus entretenir la confusion traditionnelle.

L'ère primaire se termine avec l'assouplissement des plissements hercyniens qui balayent l'Europe du Nord.

Ces plis, dont il ne reste plus que le tracé de leurs axes (voir fig. 23), ont été arasés pendant la période permienne ; mais, hors de leurs phases de paroxysme, ils ont conservé une activité actuelle, même si elle est très discrète et ne provoque aucun cataclysme.

#### L'orogénie pyrénéenne

L'orogénie pyrénéenne débute au Cénomaniens ; elle élève d'abord une chaîne de l'Atlantique à la Méditerranée.

Plus tard, la phase pyrénéo-provençale édifie d'autres reliefs : Estaque, Trévaresse, Ste-Victoire, Luberon, Ventoux-Montagne de Lure, arc de Castellane.

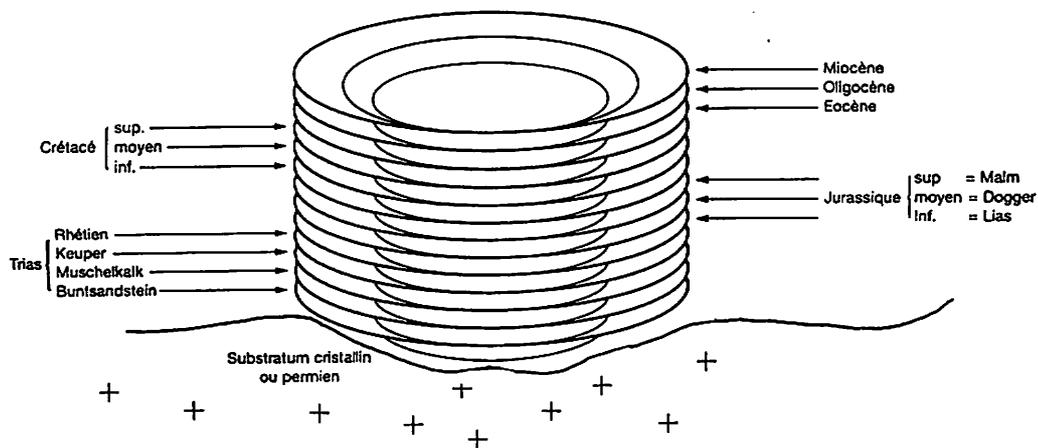


Fig. 4. – La pile d'assiettes évoquée par les auteurs au début de ce siècle [2] symbolisait la tranquillité apparente de la sédimentation accumulée dans l'aire anglo-parisienne. Il est permis de regretter que cette simplification abusive jouisse toujours d'une certaine audience.



Fig. 5. – À la fin de l'ère primaire, la France est une aire continentale plissée. Malgré les retouches dues aux orogénies pyrénéenne et alpine, l'architecture primaire domine en plusieurs régions.

### Plissements alpins

Le début de l'ère tertiaire coïncide avec l'éveil des plissements alpins dont le front se déverse sur l'avant-pays. Ils submergent le système provençal sur 5 km à Gréoux-les-Bains, déploient les nappes de charriage qui caractérisent cette orogénie, modèlent le Jura en forme de croissant, télescopent la Forêt-Noire dans sa partie méridionale.

### Plis posthumes

Les ondulations à grand rayon de courbure observées dès le début du siècle et désignées sous le nom de plis posthumes, avaient été attribuées aux derniers soubresauts des plissements alpins. L'interprétation reposant sur l'évocation de répliques à distance des plis alpins proprement dits, est quasi abandonnée. La réactivation des vieilles structures hercyniennes rend mieux compte des observations les plus récentes surtout au plan hydrogéochimique.

### Domaines nordique et mésogéen

Au début de l'ère secondaire, les blocs continentaux canadien, scandinave et sibérien sont encore très proches ; un vaste domaine marin recouvre l'espace qui deviendra le bassin parisien sur lequel sévit un climat froid, de type boréal.

Ancêtre de la Méditerranée, la Mésogée ceinture la planète. Son rivage septentrional s'aligne entre les 47

et 48° parallèles ce qui correspond au rebord méridional du bassin de Paris. Cette ligne de partage comporte deux fenêtres : ce seront les seuils du Poitou et de Bourgogne. Leurs mouvements positifs et négatifs conditionneront les communications entre les deux domaines (fig. 6).

Ainsi, les grès du Keuper moyen de Lorraine livrent des mollusques typiquement méridionaux. De même au Jurassique moyen, des récifs forment l'armature des côtes de Moselle. Au Jurassique supérieur, les côtes de Meuse sont envahies par d'autres récifs.

La poussée africaine relayée par la poussée himalayenne restreint et morcelle le domaine mésogéen dont subsistent : Méditerranée, mer Noire, Caspienne et mer d'Aral, lacs Balkhach, Zaïsan et Baïkal, mer d'Okhotsk.

Le dépôt des craies marque une large communication entre Aquitaine et domaine parisien : il s'agit d'un faciès de mer chaude que l'on trouve des Charentes à la Picardie. En Normandie, la craie verte doit sa coloration à la glauconie qui annonce la proximité d'un rivage.

### Dolomitisation

Il s'agit d'un processus chimique diagénétique tardif, modifiant profondément la composition minéralogique d'un sédiment, avant qu'il ne passe du stade de la boue à celui d'une roche, en retardant sa pétrification.

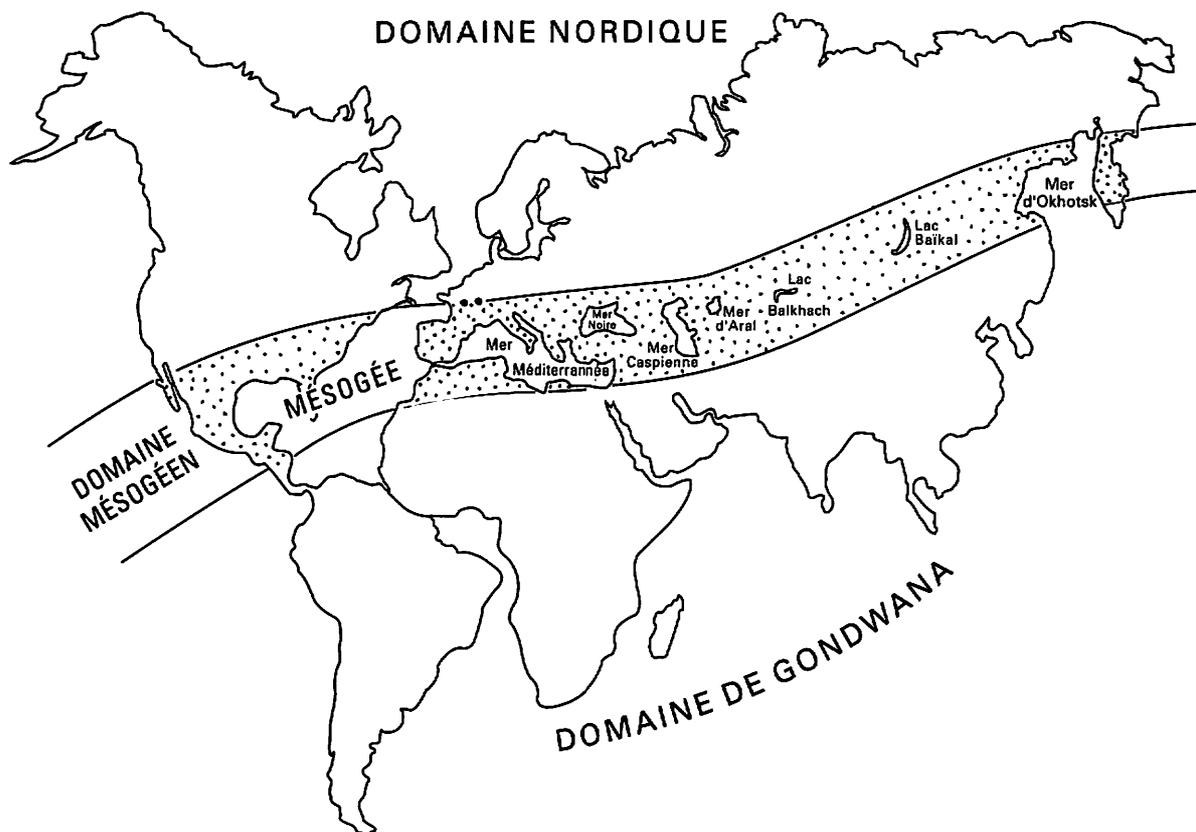


Fig. 6. – Domaines nordique et méditerranéen. Les deux points placés sur le rivage Nord de la Mésogée sont : Poitiers et Langres.

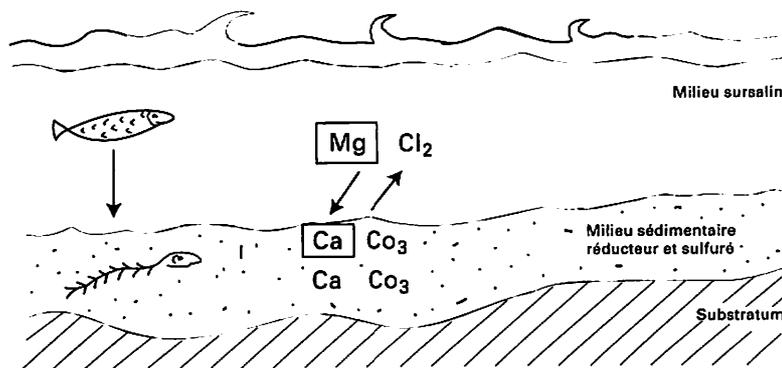


Fig. 7. – Processus de dolomitisation.

Pour que la dolomitisation se déclenche, il faut réunir un certain nombre de conditions :

- existence d'un haut fond isolant une lagune littorale de la haute-mer (comparaison : étangs du Rousillon) ;
- évaporation intense installant un milieu sursalé favorisant la concentration en chlorure de magnésium ;

- température supérieure à 23°C en toutes saisons ;
- fond de lagune (déchets de la vie) tapissé d'un film biologique en l'état réducteur et sulfuré (exemple : mer Morte).

Ces conditions étant remplies, la boue carbonatée calcique, phase solide, entre en réaction avec  $MgCl_2$  phase liquide, et la dolomitisation s'amorce (fig. 7) :

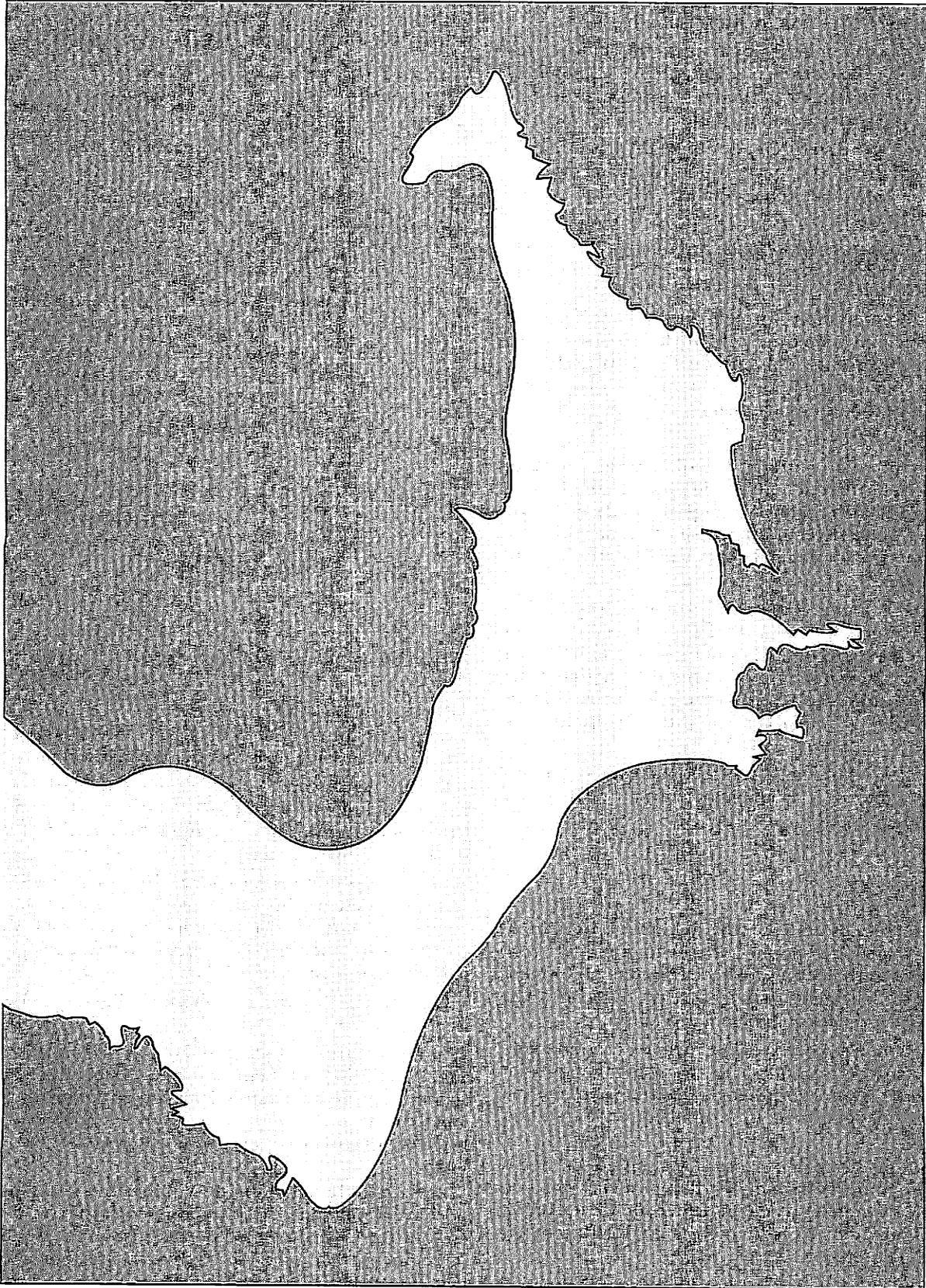


Fig. 8. - Carte de l'aire sédimentaire commune aux régions londonienne, lorraine, et souabe pendant le Lias.

Ca<sup>+</sup> (P.M. = 40, mE = 20) est remplacé par Mg<sup>++</sup> (P.M. = 24,30, mE = 12.15) dans une proportion qui ne peut dépasser 23 p. cent du Ca<sup>+</sup> disponible.

Un nouveau minéral apparaît : la dolomite, carbonate double de calcium et magnésium. La dolomitisation signe généralement une régression marine, une situation en bordure d'un continent.

L'hydrogène sulfuré et des traces hydrocarbonées sont des critères qui ont contribué à attribuer à ces calcaires le nom de dolomies fétides.

### Principaux exemples de dolomitisation

#### • Muschelkalk :

La dolomitisation s'installe en divers points de la Lorraine, notamment à l'aplomb des axes hercyniens qui la traversent : dolomie de Vittel, Wasselonne, Ribeauvillé, et sur le seuil de Bourgogne à Fresnes s/Apance, Bourbonne-les-Bains.

#### • Keuper moyen :

Une auréole continue de dolomie de 4 à 12 m d'épaisseur marque une fin de cycle. S'étendant de Delme à Château-Salins, Varangeville, Charmes, Mirecourt, Gironcourt et Contrexéville, elle retient un aquifère qui titre localement plus de 200 degrés hydrothermiques.

Cette dolomie correspond à une sédimentation confinée en milieu sursalin. En concession de La Madeleine, nous observons une coiffe d'anhydrite si la couverture argileuse est supérieure à 100 m. Le gypse se substitue à l'anhydrite si le recouvrement mesure de 100 à 50 m. Les évaporites ont disparu si les argiles mesurent moins de 50 m.

L'eau produite par cette dolomie est dangereuse pour la santé ; sa consommation entraîne des troubles métaboliques.

### Morphologie

Le survol des unités stratigraphiques du bassin de Paris évoque un dispositif comprenant une alternance de dépôts carbonatés et argileux. Les premiers forment des encorbellements orientés à l'Est ; les seconds, des plaines déprimées qui s'étendent à leur pied.

L'action destructrice des agents de l'érosion appliquée sur des durées qui se mesurent en millions d'années dégage une morphologie désignée par le terme de *Côte* qui appartient au vocabulaire de la tradition régionale.

Positions stratégiques, ces Côtes ont été occupées par l'homme dès l'âge du fer. Plus tard elles ont joué un rôle de premier plan dans le découpage territorial féodal puis, ducal. Elles ont cristallisé la stratégie des grands conflits.

L'appellation Côte doit être réservée à la désignation d'un littoral qu'il soit bas ou escarpé, il désigne

une ligne de rivage. Les Côtes de Lorraine étant des reliefs d'érosion, la seule appellation correcte géographiquement parlant, est celle de *Cuesta* adoptée au cours de divers congrès internationaux de Géographie.

Les principales *cuesta* sont, d'Est en Ouest :

Trias :	Muschelkalk,	Sarrebourg, Blâmont
	Dolomie du Keuper moyen,	Vic sur-Seille ;
Jurassique :	Sinémurien	Percée de la Meurthe à Dombasle, « Côte » de Moselle, Sion, Vaudémont, Nancy, Metz ; « Côte » de Meuse, Vaucouleurs, Toul, Saint- Mihiel, Verdun, « Côte » des Bars,
	Argonne,	Bar le Duc, Bar-sur-Aube, Bar s/Seine ; Triaucourt, Sainte- Menehould ;
Crétacé :		Sézanne, Verberie.
Eocène :	Ile-de-France,	

### Formations carbonatées continentales

Nous évoquons sous ce titre quelques particularités locales dont l'intérêt, replacé dans un cadre plus général, dépasse le stade de la description anecdotique.

Il s'agit des **travertins** dont le volume est parfois si important qu'ils ont été exploités en carrière. Ceux de Champigny-sur-Marne et Sézanne ont alimenté les musées du monde entier.

Ce sont des édifices carbonatés déposés autour de sources en déséquilibre calco-carbonique. Dès l'émergence, une pluie de calcite microcristalline enrobe les parties les plus délicates des végétaux développés sur le site : fleurs, étamines.

Ces travertins sont la mémoire climatique de l'époque :

1) Le travertin de Celle-sur-Moret est exemplaire : superficie 5 ha, épaisseur : 8-15 m. Ces paramètres signent, comme en d'autres lieux, l'intervention d'un émetteur de gaz carbonique à travers le réseau fissural accompagnant les grandes fractures loco-régionales.

2) La double faille dite de Vittel est un accident découvert pendant les travaux de construction de la voie ferrée en 1886 [29]. Deux sources, l'une ferrugineuse, la seconde carbo-gazeuse ont été décrites aux pk.71,30 et 71,245 (Ch. Jannel 1887). Captées pour assainir la plate-forme, elles alimentent un

faible écoulement artésien peuplé de myriophylles servant de support à un travertin qui moule tiges et feuilles.

3) À Vincey (88), la construction d'un tuf procède de l'éruption d'un aquifère carbo-gazeux pressurisé traversant les alluvions de la Moselle à l'emporte-pièce. La dissipation du gaz carbonique était suivie par des dépôts orbiculaires de carbonate de calcium s'élevant jusqu'à l'équilibre hydrostatique. Pour cette raison les deux édifices aujourd'hui détruits avaient pris l'allure de termitières émergeant au milieu de la plaine d'inondation.

#### Acquisitions récentes

Les perfectionnements apportés à la compréhension de la tectonique des plaques, les applications du rayonnement laser à la métrologie, nous conduisent à considérer les phénomènes géologiques comme des successions de périodes d'éveil, de paroxysmes, suivis d'un retour au calme.

Depuis quelques décennies, nous savons que tout bouge [5] :

- le rift méditerranéen continue à éloigner les continents américain et eurafricain à la vitesse de 10 cm/an mesurés quotidiennement par visée satellite ;

- les mesures faites depuis la vallée sur la cible d'un refuge, démontrent que le massif du Mont-Blanc s'élève à la vitesse de 1 mm/an, soit, à supposer que le mouvement soit continu et isochrone, un gain en altitude de 1 000 m par million d'années ;

- un programme intergouvernemental France-Benelux s'était donné pour objectif de réviser la couverture topographique. Le médimarmètre de Marseille a été à cette occasion, corrigé de 0,53 m.

Il est établi que les déformations topographiques sont généralisées, positives ou négatives [5], plaquées sur les axes des plis hercyniens. La précision des mesures est de l'ordre du 1/10 mm.

Dans les années 50, le massif du Mont-Blanc, formé protogène, un leucogranite verdâtre, était présenté comme une exception pétrographique locale.

En juillet 1997, grâce aux progrès accomplis dans toutes les branches des Sciences de la Terre et notamment en géochimie, Mont-Blanc et Cervin sont maintenant considérés comme des enclaves exotiques de la plaque africaine incorporées à l'ensemble orogénique alpin.

Ainsi vont les choses ; nous n'en sommes point à notre dernière surprise.

#### Les altérations mécaniques des roches

La **fissuration** résulte des écarts de température encaissés par les roches compactes quelle que soit leur constitution minéralogique.

L'ouverture des fissures peut atteindre une dimension centimétrique, elle se ferme en profondeur, devient capillaire vers 40 m et au-delà.

La **fracturation** est d'origine mécanique ; elle est associée aux efforts de plissements ou aux relations entre plaques continentales qui s'affrontent, se chevauchent, sont en extension ou en compression.

Les **failles** affichent un décalage entre les deux lèvres d'une fracture ; le rejet se mesure au moins en mètres, parfois en milliers de mètres.

Une famille de failles vient d'être évoquée : ce sont des accidents syn/post pyrénéens d'orientation ouest-est, conforme à la propagation des plissements.

La seconde famille est d'âge alpin, générée par d'autres contraintes d'orientation est-ouest. Les failles ont en conséquence adopté une direction méridienne.

Ainsi, un grand nombre de cassures suivent le cours de la Meuse et traversent la Lorraine du sud au nord.

Les plaines d'effondrement internes au Massif central sont autant de rifts intraplaques encadrés par des failles d'âge alpin : telle la Limagne.

D'autres traversent la partie centrale du Bassin de Paris : faille de Château-Landon, Pays de Bray, Loing et Seine.

Les failles jouent un rôle considérable dans la circulation des eaux souterraines. Les fissures relayant les fractures entretiennent un risque évident de contamination physique (karst), chimique (agriculture, industries), biologique (assainissement).

Les grands accidents transrégionaux, telles les failles-limites des rifts rhénan, de l'Allier et du Forez sont la voie privilégiée de la remontée des eaux profondes.

### NAISSANCE - CROISSANCE - EXTINCTION D'UN BASSIN SEDIMENTAIRE

La description des roches sédimentaires prend en compte la roche de **faciès marin** datée par des fossiles-guides spécifiques de son époque.

Les mollusques bivalves (moule, huître) les gastéropodes (bigorneau) sont ubiquistes. Ils ne caractérisent que des conditions de vie littorale, à toutes les époques. Ces mauvais indicateurs ne sont pas pris en compte.

Parmi les céphalopodes, seules les ammonites, dont le renouvellement des genres et espèces est rapide, sont de bons indicateurs chronologiques. Pour cette raison, nous ferons débuter dans notre quête des eaux minérales, l'histoire du bassin de Paris avec la première arrivée marine sur le continent hercynien.

L'extinction sera ponctuée par le retrait de la mer en direction du Nord et la persistance sur notre sol de grandes lagunes ou de grands lacs qui persisteront jusqu'à la fin de la première moitié des temps tertiaires. Ce sera le cas des lacs de Brie, Beauce, Montmorency et Provins qui ne manquent pas d'intérêt, mais se placent dans un cadre différent.

### L'ère primaire

Nous résumons cette longue période en deux épisodes :

#### Le Carbonifère

La plate-forme européenne est partagée en plusieurs domaines :

- *marin*, accumulant des calcaires quelquefois récifaux ;
- *continental*, aux reliefs alimentant une érosion torrentielle qui ensevelit le couvert végétal et contribue à l'accumulation du charbon ;
- *saumâtre*.

De tels gisements existent au rebord du futur bassin : Grande et petite Fosse, Lubine, Colroy, etc. Le déploiement des plissements est accompagné de manifestations volcaniques très actives : le complexe Senones-Donon-Nideck est considéré comme le plus imposant de son époque.

Les laves de nature rhyolithique ont la même composition que le granite commun. Plus tard, nous évoquerons d'autres laves de composition et de genèse radicalement différentes.

Un tel contexte est favorable *a priori* à l'émergence de sources très peu minéralisées et carbo-gazeuses.

#### Le Permien

La seconde partie de l'ère primaire est un épisode continental : le Permien. L'Europe occidentale est émergée, la mer s'est retirée sur les confins russo-polonais. Le climat est devenu tropical à saisons contrastées, favorable à l'hydrolyse des silico-aluminates et à l'arénisation du granite.

Deux formations se mettent en place, symétriques, délimitant la future aire de sédimentation anglo-parisienne :

- old red sandstone au NW de Londres,
- vieux grès rouges, ou, plus simplement : grès rouges qui, dans la terminologie lorraine s'opposent et se distinguent des grès roses (triasiques).

Leur extension est considérable du Donon à Plombières. Ils nivellent les irrégularités du paléo-relief. Dans les zones instables (Bruyères, Raon, Saint-Dié, Plombières, Ronchamp) ils peuvent s'accumuler sur des épaisseurs supérieures à 1 000 m.

### L'ère secondaire

La dénomination des subdivisions de l'ère secondaire répond au plan linguistique, aux conventions de Genève : dans la langue du pays qui a présenté la première description de l'étage.

En conséquence, la terminologie est :

- alémanique pour le Trias,
- francophone pour le Lias et le Crétacé,
- anglophone pour le Dogger et le Malm (Jurassique moyen et supérieur).

#### Trias

L'avènement des temps secondaires est marqué en Europe occidentale par la submersion de la plate-forme primaire sous un épandage de sables, graviers et galets fluviaux recouvrant Vosges, Forêt-Noire et Palatinat [47].

Cet ensemble constitue les New red sandstone, « Nouveaux grès rouges » par opposition aux Vieux grès rouges évoqués précédemment. Ce sont les Grès vosgiens *lato sensu*. Ils se différencient en plusieurs formations qui, toutes, à l'exception des conglomérats, retiennent des aquifères dont le rôle est important.

Le Trias est, comme son nom le laisse supposer, une trilogie comprenant : Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper.

#### Le Buntsandstein

- Les Grès vosgiens au sens strict sont représentés en Lorraine centrale par une accumulation alluviale apportée par des courants fluviaux essoufflés, à l'image de ce qui se passe actuellement aux bouches du Rhin, de l'Escaut et de la Meuse. Il s'agissait d'un écoulement par des bras multiples, anastomosés en réseau.

Les grains de sable quartzeux, très isodiamétriques sont liés par un ciment d'hydroxydes de fer qui laisse des vides importants, présage d'une bonne capacité aquifère.

L'épaisseur est variable ; elle passe de zéro à plus de 300 m.

- Le *Conglomérat principal* (Hauptkonglomerat) résulte de l'enrichissement progressif en galets de quartz, quartzite et lydiennes, jusqu'à former une corniche de 20-30 m de haut d'aspect ruiniforme (Saverne, Pierre Percée) [7, 16].

Les lydiennes sont datées du Silurien par les Graptolites qu'elles contiennent [7]. Il s'agit d'un continent disparu, résolu en galets et graviers.

Les Couches intermédiaires (Zwischenschichten) offrent une alternance régulière de bancs de grès rouge violacé, dolomie verte, marne versicolore dont c'est la première apparition. Ce niveau est sursalin.

Le Grès bigarré ou grès à Voltzia est ainsi nommé à cause de la riche flore qu'il a livré. Déposé dans les mêmes conditions que le grès vosgien, sa faune de poissons, batraciens, reptiles est d'une exceptionnelle richesse. La flore comprend des plantes entières : racine, tige, feuilles, fructifications.

Les grains de sable, encore plus fins, liés par un ciment calcomagnésien destinent cette roche à la construction des édifices monumentaux civils, militaires et religieux. C'est aussi un bon réservoir aquifère.

### Le Muschelkalk

Ce complexe se subdivise en plusieurs termes. Nous retiendrons ceux qui s'alignent dans notre objectif [8] :

- Le Grès coquillier est à la base de la série. Il revêt une importance considérable parce que l'affaissement de la dépression eifélienne, entre Trèves et Thionville, permet à la mer germanique de s'avancer vers l'ouest, et s'étendant le long des Vosges jusqu'à Plombières, signer l'acte de naissance du bassin de Paris.

- Les Couches rouges, grises et blanches sont marneuses. Elles contiennent un dépôt de sel gemme dans l'axe du synclinal de Sarreguemines.

- Le Calcaire à entroques est oolithique, très pur ; poreux et fissuré c'est un bon réservoir aquifère.

- Le Calcaire coquillier est une alternance de couches calcaires compacts et de marnes feuilletées perméables par fissuration. Réservoir aquifère de premier plan.

- Les Dolomies de Vittel, Bourbonne-les-Bains, Waselonnes, Ribeauvillé, sont des accidents géochimiques locaux attachés à un contexte de haut-fond.

### Le Keuper

Des marnes dolomitiques et gypseuses, bariolées de vert, rouge, et violet ont reçu le nom de Keuper (versicolores). Cet étage joue un rôle industriel important : raffinage du sel de consommation humaine, industrie du carbonate de sodium. Jadis, il était écrit dans les livres que le gisement de Nancy-Dombasle était le plus vaste du monde. Les recherches pétrolières ont modifié cette vision : le gisement de sel gemme se prolonge vers l'ouest jusqu'à Sezanne ; son épaisseur maximale à l'aplomb de Montier en Der atteint 150 m de sel cumulé (fig. 9).

### **Jurassique**

L'aire de sédimentation continue de s'étendre, la surface de socle encore découverte diminue progressivement [46].

#### Jurassique inférieur : Lias (Jura noir)

Le rivage du Lias transgresse à l'ouest le méridien de Paris. Les conditions climatiques du Jurassique inférieur sont boréales.

Trois faciès côtiers :

- le grès de Luxembourg cerne le bord des Ardennes françaises et luxembourgeoises. Il retient un aquifère précieux,

- le Morvan est ceinturé par un minerai de fer qui sera à l'origine de la métallurgie au Creusot qui possède déjà le charbon,

- les calcaires coquilliers de Semur sont le type du Sinémurien.

Partout ailleurs, les courants équirépartissent des argiles noires entre la Lorraine (fig. 10) et la Souabe [35, 20] (Levallois 1831) recouvrant une immense vasière littorale, comparable aux dimensions près à notre golfe du Morbihan.

Lorsque les argiles se chargent d'une trame carbonatée elles prennent le faciès schistes-carton, marnes papyracées imprégnées de substances bitumineuses localement exploitées par pyrogénéation : Jussey, Vitrey.

#### Bajocien - Bathonien (= Dogger = Jura Blanc)

La mer s'avance jusqu'à Bayeux, puis Bath, brillante ville thermale dès le II<sup>e</sup> siècle.

C'est l'époque de la « Grande oolithe » des auteurs du siècle précédent.

Le climat a changé. L'ouverture des seuils du Poitou et de Bourgogne facilite l'arrivée de courants chauds. Les conditions de température (> 23°C), l'agitation, sont favorables au concrétionnement du carbonate de calcium et à la formation d'oolithes selon le principe de la dragéification.

À ce processus chimique s'ajoute un processus biologique ; en raison des conditions de milieu : oxygénation, limpidité, la mer est envahie par des organismes constructeurs de récifs-barrière.

Le grand rift intercontinental s'anime : un panache géothermique s'installe au nord de Strasbourg, soulève la région comprise entre Mulhouse et Franckfort, isole la Lorraine de la Souabe. Les contours d'une terre émergée se dessinent, celle-ci ne sera plus jamais immergée avant le début de l'ère Tertiaire.

#### Jurassique Supérieur = (Malm)

Le cycle jurassique est caractérisé dans sa globalité par la répétition de la séquence argile/calcaire décrite au Lias et au Bajocien.

D'où la morphologie commune aux *cuesta* de Meuse et de Bar, par référence à celle de Moselle [10].

Le rythme bimodal est sous la dépendance de facteurs sédimentaires et climatiques :

- influence boréale et subtropicale alternantes,
- chimiogénèse des carbonates par opposition à leur biogénèse,

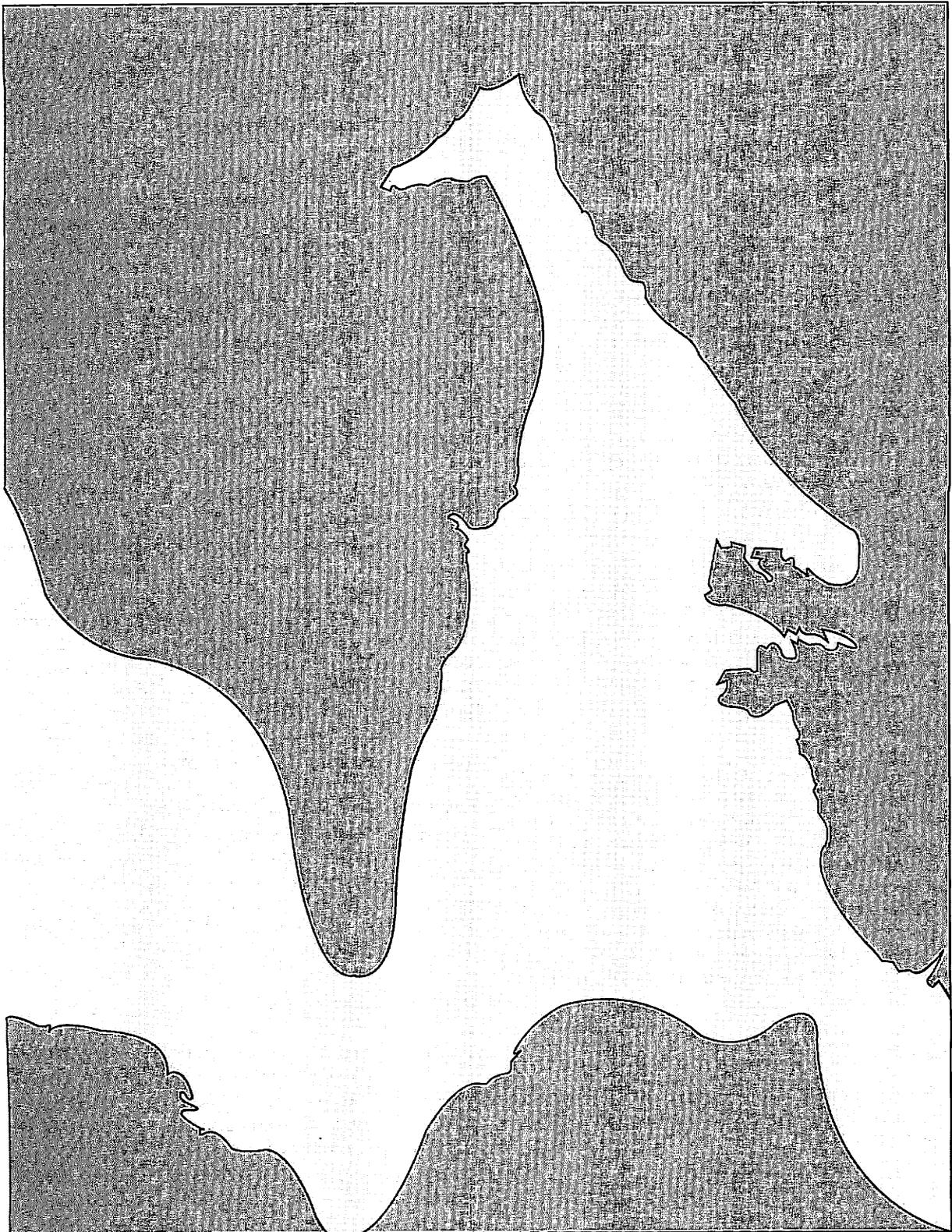


Fig. 9. - Le Bassin de Paris au Jurassique moyen (= Dogger).

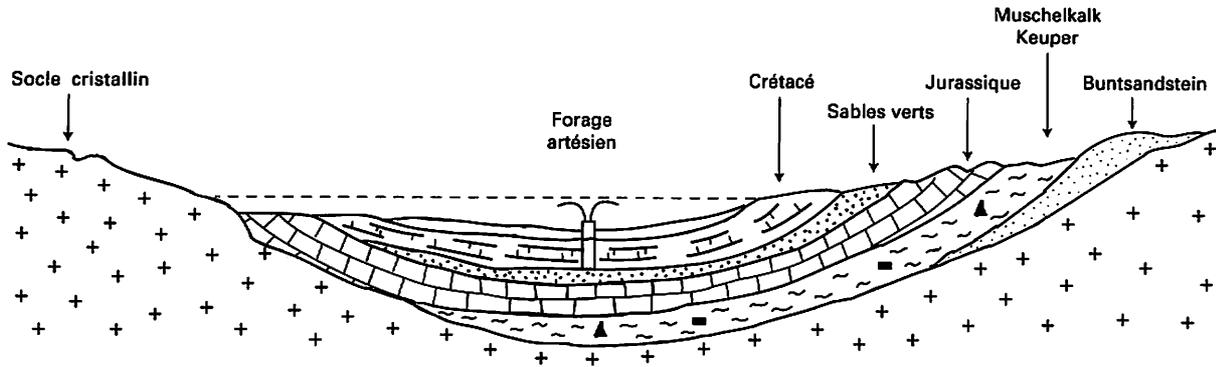


Fig. 10. - Schéma traditionnel du dispositif aquifère aptien-abien. Cette conception de la nappe des Sables verts dont le niveau hydrostatique s'équilibrerait un peu au-dessous de l'altitude des aires d'infiltration est une tenace survivance du passé ignorant les paramètres de l'hydraulique souterraine. Sa référence est celle des vases communicants. Excusable en 1835.

- importance croissante des récifs en distinguant avant-récif, arrière-récif, lagon et atoll couvert d'une végétation de Cycadacées,

- ouverture/fermeture des communications par dessus les seuils ce qui favorise ou suspend les influences mésogéennes.

La lecture de l'histoire du Jurassique lorrain nous plonge dans la mouvance de l'évolution du paysage [31].

Le cycle jurassique se termine avec le dépôt des calcaires portlandiens soulevés avant la fin de leur genèse, de sorte qu'un haut-fond se dessine le long de l'axe Beynes, Meudon, Cachan, Saint-Dizier, Bar-le-Duc, Pont-à-Mousson, Sarrebrücken et que la dolomitisation s'installe dans le Barrois.

L'émersion suivie d'une fissuration ouverte en événement permet une karstification précoce.

**Le Crétacé**

Le Crétacé inférieur

*Situation générale*

Le domaine mésogéen couvre une surface considérable à la périphérie de l'arc alpin et à l'emplacement du Jura. Il submerge le seuil de Bourgogne [49].

Les types des étages sont définis pour la plupart dans le Jura franco-suisse, et les Alpes de Provence :

- Valanginien - Valangin (CH),
- Hauterivien - Hauterive (CH),
- Néocomien - Neufchatel (CH),
- Barremien - Barème (F,04),
- Aptien - Apt (F,84),
- Albien - Dépt. Aube (F,10).

*Situation régionale*

La terre émergée à l'emplacement du dôme rhénan sépare définitivement les domaines lorrain et souabe.

L'axe antiforme Saint-Dizier - Bar-le-Duc - Lérerville - Pont-à-Mousson est ceinturé par la transgression crétacée qui le submerge et le comble de vases littorales saumâtres (dessalées) ou lagunaires (sursalées).

En milieu réducteur, la biogenèse les transforme en un minéral de fer singulièrement précieux puisque dépourvu de phosphore. Il fera la richesse de la sidérurgie des vallées de la Saulx et de l'Ornain.

*Principaux faciès*

Les sables blanc aptiens, constituent une formation en biseau qui ne s'étend pas très loin vers l'ouest. Ils retiennent un bon aquifère qui alimente les agglomérations rurales.

Les sables albiens ou sables verts ainsi nommés à cause de leur richesse en un silicate de fer de couleur verte (Glauconie) ont contribué à généraliser le mode de captage par forage artésien, initié dans l'Artois.

Ces sables sont un bon réservoir aquifère du point de vue de leur porosité, transmissivité, coefficient de remplissage, trois critères dont la saisie est fondamentale avant tous travaux.

Au plan historique, rappelons que le premier forage aux Sables verts a été foncé dans Paris, au n° 59 de la rue de Grenelle. Il est agrémenté d'une magnifique fontaine monumentale due au ciseau de Bouchardon.

Les marnes du Gault correspondent à la Champagne humide. Imperméables, elles sont vouées à la culture et au pâturage. Épaisses de 60 à 80 m elles protègent efficacement l'aquifère des sables et contribuent à la mise en pression des deux nappes captives albo-aptiennes.

Toutefois, les schémas classiques de la bibliographie (fig. 10) sont des enfantillages inacceptables à cause du caractère abusif de leur simplification.

### Le crétacé moyen

Le Cénomaniens tire son nom de sa localité-type : Le Mans. L'étage est représenté par des sables, le contexte est littoral.

À l'opposé, le massif de l'Argonne dessine un relief marqué par le faciès local de la Gaize. Ce sédiment est à la fois argileux, carbonaté et siliceux par sa trame calcedonienne dérivant de la fossilisation d'éponges siliceuses. Les affinités climatiques nordiques sont évidentes.

La gaize est un très bon réservoir d'eau, sa nappe alimente d'innombrables sources. La vocation thermique ou minérale est nulle.

### Le Crétacé supérieur

C'est le domaine de la craie ; celui de toutes les craies, car plusieurs cycles subdivisent ce faciès, séparés par le retrait des rivages suivi de leur submersion renouvelée.

Le seuil du Poitou est largement ouvert sur l'Aquitaine, la craie de Champagne s'identifie à la Campagne charentaise.

Cette roche est formée de milliards d'animalcules microscopiques (Coccolithes) à paroi molle couverte de plaques circulaires d'aragonite. Leur accumulation se mesure en centaines de mètres.

La craie est une roche à très haute teneur en carbonate, mais il existe des variantes : craie marneuse, craie verte glauconieuse de Rouen, phosphatée de Picardie, dolomitique enfin.

Le fond reçoit une quantité importante de matière organique qui subit le *kraking* en milieu réducteur, ce qui libère une première vague d'hydrogène sulfuré. Le résidu (kérogène) est le premier maillon des processus bio-chimiques qui conduisent aux hydrocarbures.

Ceux-ci migrent. Partout où les sédiments de la craie auront été enfouis dans un milieu clos, fermé par un écran argileux garantissant la conservation du milieu réducteur, il sera permis d'espérer trouver de l'huile. Ailleurs, l'oxydation conduira aux : bitume, asphalte et kerabitume selon le gradient d'oxydation.

Nous reviendrons sur ce point précis.

L'épisode de la craie se termine par un retrait progressif de la mer, des Charentes à la Normandie, de la Belgique au Danemark suivi par l'émersion généralisée de ce qui reste du bassin.

Ainsi se termine l'histoire du Crétacé et celle des temps secondaires.

### Le devenir des déchets de la vie crétacée

Il est fréquent d'observer que la décomposition *post-mortem* d'un organisme est un centre d'attraction chimique, et que de nombreux éléments-traces cristallisent à son contact.

Dans le cas de la craie, la densité de la vie planctonique implique que la biodégradation n'est pas anecdotique. C'est une composante du milieu sédimentaire. Si elle n'est pas permanente, elle offre un surcroît d'activité en saison chaude.

Le soufre cellulaire et tissulaire biodégradé en aérobie limitée donne naissance à des petits cristaux cubiques de pyrite, isolés, disséminés dans la masse de la craie. Ceux-ci recristallisent sous la forme radiaire de la marcassite, minéral assez abondant pour avoir dans le passé, alimenté une industrie régionale du fer basée sur le grillage des pyrites.

Le soufre biologique, conservé sous la protection d'une couverture sédimentaire étanche lutétienne, a subi le *kraking* en partie au moins. Il a pu participer au *reforming*, toujours partiellement, dans le gisement qui l'a accueilli après sa migration primaire. Or, ce gisement, ce sont les sables et graviers du Soissonnais que nous aborderons prochainement.

### **L'ère tertiaire**

Quatre cycles recouvrent la durée du Tertiaire ; deux seulement seront abordés parce que leur domaine est encore marin. Les deux autres se déroulent en milieu continental ; lacustre le plus souvent.

- Oligocène ;
- Pliocène ;
- Eocène ;
- Miocène.

Lorsque la mer reprend possession de l'Île-de-France, elle dessine un long ruban dont les rivages appuyés sur les Flandres et le Weald se déroulent jusqu'à l'ouest de Paris.

Le mouvement transgressif se traduit par des pulsations positives bientôt suivies d'une rémission, voire d'un retrait discret. La pulsation suivante s'avance un peu plus loin. Le mouvement de va-et-vient se répète d'où la monotonie de descriptions qui ne s'imposent que dans le cas d'une étude locale détaillée. C'est pourquoi [18], nous retiendrons seulement les événements qui ont un rapport avec la minéralisation de certaines eaux souterraines précises.

### Le Thanétien

Le front transgressif parvient jusqu'à Issy-les-Moulineaux, Mareil-sur-Mauldre, Mantes-la-Jolie. Sur son parcours des baies peu profondes constituent des

domaines presque fermés recevant les produits de l'érosion torrentielle de l'arrière-pays et du décapage du couvert végétal. Sa macération conduit à une humification : la matière organique fossilise sous forme de Lignites : matériau brun, finement divisé, granuleux, friable, exploité par les viticulteurs dans la Montagne de Reims pour l'amendement. Partout où ils affleurent sous la *cuesta* de l'Ile-de-France, les Lignites ne sont qu'une substance utile. Ils peuvent, en d'autres circonstances, contribuer à une forme précise de minéralisation des eaux souterraines.

Les sédiments du Thanétien sont ceux d'une mer peu profonde, littorale : sables, plus rarement grès ou tuffeau, tous différents mais isochrones ce qui rend les corrélations difficiles.

### Le Sparnacien

Cet étage a été défini à Epernay. Il est le modèle du milieu saumâtre : argiles plastiques dont le litage est souligné par des lignites d'épaisseur millimétrique à centimétrique. Des accumulations puissantes semblent être associées à une instabilité du fond : plus de 50 m à Enghien-les-Bains, plus de 75-85 m à Dammartin-en-Goële. Lorsque l'épaisseur est métrique, il faut envisager des dépôts de chenaux.

### Le Cuisien

La mer revient, mais cette transgression ne concerne qu'une toute petite surface, les rebords de l'Ile-de-France s'étant soulevés au point d'en réduire l'espace à celui de l'ombilic du bassin.

Les sédiments sont essentiellement sableux, graveleux, localement consolidés par une trame carbonatée (tuffeau, grès).

### Lutétien

Le Lutétien marin repose directement sur la craie, le mouvement transgressif est important et progressif.

Le faciès fondamental est un calcaire coquillier dessinant un vaste plateau de Cambrai à la banlieue SW de Paris. Il commande à la morphologie régionale, étant disséqué par l'érosion en buttes-témoin qui dominent la plaine crayeuse du haut de la *cuesta* de l'Ile-de-France.

De part et d'autre du chenal principal, des baies plus ou moins fermées sont favorables à l'installation de faciès saumâtres.

Les dépôts de rivage sont nombreux. Le plus célèbre est à Grignon : les fossiles de cette localité figurent dans les musées du monde entier.

La surélévation locale synsédimentaire favorise la formation d'îlots de dolomitisation. Les amas de bois flotté lignitisé ne sont pas rares.

Le calcaire « grossier » comporte des niveaux de roche de très bonne qualité : banc royal exploité dès le XVII<sup>e</sup> siècle pour la construction du palais de Versailles. À part cet exemple hors du commun, le calcaire grossier fait partie intégrante de l'histoire architecturale monumentale de Paris.

Exposé aux actions climatiques depuis son émergence et parallèlement aux soulèvements locaux qui ouvrent sa fissuration, le calcaire grossier alimente des sources captées pour les adductions d'eau gravitaires des villages. Compte-tenu de la vocation agricole du plateau, la qualité bactériologique de l'aquifère demande une étroite surveillance.

### Le Bartonien

Le Calcaire de Saint-Ouen est d'origine lacustre, formé de bancs blanc/gris interstratifiés de marne tout à fait blanche, localement riche en carbonate de strontium.

La strontianite est un minéral rare ; les gisements les plus connus sont en Tunisie, Ardèche, Gard et Corrèze. Dans le bassin de Paris réduit à ses contours éocènes, le minéral est cité à Issy-les-Moulineaux, Clamart et Montigny. Il coexisterait à Montmartre avec son sulfate, la célestine.

Quoique la ville d'Enghien-les-Bains se réclame du Calcaire de Saint-Ouen pour désigner le réservoir de ses eaux sulfurées, le strontium n'a pas éveillé de curiosité, notamment dans le domaine de la pharmacodynamie.

Le calcaire de Saint-Ouen s'étend jusqu'aux abords du Vexin où il s'amincit à moins d'un mètre. De Paris, où les autres auteurs lui accordent une épaisseur de 8 à 12 m, le gisement s'étend en direction de l'est jusqu'à Noisy-le-Sec.

Sous le nom de calcaire de Ducy, quelques bancs de roche très compacte sont décrits à la base du Calcaire de Saint-Ouen. Il s'agit, selon les auteurs [41] d'un micro-faciès local qui ne permet pas de synthèse à grande distance.

### Le Ludien

Le cycle éocène se termine par un épisode lagunaire et le dépôt du gypse dans le vaste périmètre que la carte géologique au 1/50 000 délimite par défaut : la Francilienne traverse le Ludien gypsifère à Evry.

Les descriptions du siècle dernier sont précieuses ; par contre les interprétations sont à revoir.

La comparaison des rapports 32S/34S dans les gisements de Russie-Pologne (Permien) Lorraine (Trias) et Paris (Lutétien) établit un lien de filiation. Le gypse parisien serait un produit du recyclage du gypse permien. Cette proposition est plus séduisante que les processus évaporitiques échafaudés en laboratoire.

Nous nous tenons volontairement hors du débat, mais riche d'une expérience personnelle : l'observation pendant 5 ans de la mise en eau suivie de l'assèchement intégral des sebkrahs d'Oran, Mostaganem, et des chotts alignés de long de la façade saharienne de l'Atlas. Les choses sont plus complexes qu'un schéma scolaire.

### **Paléogéographie Fini - Crétacé - Actuel**

Pendant l'ère tertiaire, la mer envahit plusieurs fois le bassin ; les courants littoraux répartissent les sédiments issus de l'érosion des terres émergées dans l'arrière-pays [1, 43].

Cette mer est à la fois l'héritière de la Thétys, ancien océan du domaine nordique ouvert à l'est-nord-est, et de l'Atlantique dont l'ouverture à l'ouest ne date que du début du Crétacé.

La sédimentation est guidée par des structures anciennes, élaborées depuis 530 MA pendant la formation des chaînes primaires, hercynienne notamment.

L'orogénie alpine qui débute à la fin de l'ère secondaire et se développe au Tertiaire n'affecte le bassin de Paris que de façon indirecte : rejeux répétés des structures hercyniennes, surélévation des bordures.

Il convient donc de représenter simultanément les aspects géologique, paléogéographique et structural annoncés dans notre titre.

La période qui s'étend de la fin du Crétacé au Quaternaire se décompose en cinq épisodes paléogéographiques majeurs d'avancées et reculs des rivages.

#### Dépôt de la craie senonienne

Après l'épisode sédimentaire détritique du Crétacé inférieur (Sables verts) le Bassin parisien est recouvert par un faciès biochimique nouveau : la craie.

Il s'agit d'une vaste transgression qui établit une communication entre le bassin de Paris et la Mésogée par dessus le détroit du Poitou.

Pendant cette période, massifs armoricain et central restent émergés et distincts.

La surface du bassin s'élargit ; celui-ci communique avec le bassin de Londres, la mer du Nord et la Belgique [24].

La craie dépose dans une mer peu profonde ; l'anticlinal du Pays de Bray dessine un haut-fond et la région lilloise est à peine submergée.

Les dépôts du système de la craie senonienne se distinguent par référence aux lignes de rivage :

- non marins : saumâtres ou continentaux,
- marins : influence externe,
- marins : influence interne.

La craie peut se définir ainsi : boue micritique constituée par l'accumulation d'éléments carbonatés (calcite) associés à une proportion variable de quartz, micas, silicates, glauconie. La microfauve est abondante, la macrofauve comprend des mollusques, bryozoaires, échinodermes, spongiaires.

#### Phase lutétienne

Le Lutétien inférieur est caractérisé par une formation détritique grossière qui correspond au début d'un cycle de sédimentation normal [41]. La transgression ne dépasse pas Paris.

Puis la sédimentation devient calcaire, marquée par une diminution des apports sableux qui déposent (calcaire grossier du Lutétien moyen) un peu plus au sud (jusqu'à Houdan et Melun) et dépassent largement à l'est, les vallées de la Seine et de la Marne. Ces dépôts correspondent à un environnement calme, protégé et limpide.

Le Lutétien supérieur dépose les « caillasses » d'origine laguno-marine accompagnées de niveaux de gypse, dolomie et sépiolite. La sédimentation évaporitique et chimique succède à la sédimentation organodétritique.

Sur le continent, le Lutétien est représenté par des lacs (Chartres, Nemours, Epernay) dans lesquels se déposent des calcaires.

Ce cycle représente un tournant dans la paléogéographie du Bassin de Paris : le Massif Central ne fournit plus d'apports détritiques par suite d'un changement dans l'écoulement des fleuves et des rivières qui sont désormais détournés vers l'ouest.

Du point de vue tectonique, un basculement surélève l'est et le nord du Bassin de Paris. À partir de cette époque, l'anticlinal de l'Artois est érigé.

#### Phase stampienne

Au début du Stampien, une tentative d'incursion marine accompagnée de dépôts laguno-marins (Glaises à Cyrènes) ne dépasse pas au nord comme au sud, les anticlinaux du Bray et de Beynes-Meudon. L'espace se resserre.

Plus tard, l'influence marine s'étend vers le nord et l'est jusqu'à Epernay : marnes vertes surmontées de caillasses et du calcaire de Sannois.

Pendant ce temps le calcaire lacustre de Brie dépose à l'est.

Le centre du bassin reste laguno-marine avec le dépôt des marnes à huîtres. La mer transgresse de nouveau, s'étend au-delà de Châlons-sur-Marne à l'est, et Orléans au sud. Elle dépose les Sables de Fontainebleau.

À la fin du Stampien, la mer se retire définitivement du Bassin de Paris et d'abord par le nord.

Vers le sud, région d'Etampes, le Stampien se termine par des dépôts de calcaire lacustre tandis qu'au nord, ce sont des argiles (Meulière de Montmorency).

Au sud et à l'ouest, l'influence reste lacustre jusqu'au dépôt du Calcaire de Beauce (Aquitanien).

### Phase Pliocène

Au Pliocène, la principale transgression marine est celle de la « mer des sables rouges » qui envahit une partie du Massif Armoricaïn, Cotentin, Basse Normandie et Pays de Caux. C'est une mer étendue et très peu profonde.

Entre-temps, la formation des Alpes a entraîné la surélévation du Bassin de Paris et l'accentuation de la voûture des plissements.

L'érosion a donc repris de l'importance, c'est à cette époque que se dégagent les buttes témoins stampiennes.

À la fin du Tertiaire (Pliocène terminal), le Bassin de Paris est quasiment exondé. Des Ardennes au Massif Central descendent encore des grands fleuves qui déposent les sables de Lozère et du Bourbonnais.

Nous retiendrons quatre grandes surfaces structurales déposées au Tertiaire :

- calcaire grossier (Lutétien),
- calcaire de Saint-Ouen (Marinésien),
- calcaire de Brie (Sannoisien),
- calcaire de Beauce (Stampien).

Ces formations sont superposées en pile d'assiette comme le montre la figure 4, et séparées par des sédiments meubles (sables, gypse et argile).

Il est à noter que tout au long du Tertiaire, les matières organiques carbonatées sont sans cesse lessivées.

### Du Quaternaire à l'Actuel

L'accentuation du creusement des vallées évolue pendant le Quaternaire en particulier vers l'ouest. Ce processus en relation avec l'abaissement du niveau de la mer est lié aux glaciations.

La baisse eustatique est renforcée par l'élévation continue du Bassin débutée au Burdigalien. Ce mouvement a pu atteindre 60 m depuis la fin du Miocène.

Le synclorium de la Seine qui contrôlait déjà les incursions marines depuis le Bartonien, influence le drainage vers la Seine et le développement des méandres.

Ce court récit de l'histoire géologique du Bassin de Paris a permis de souligner les trois facteurs majeurs intervenant dans le déroulement des événements.

Tout d'abord d'un point de vue paléogéographique, il est intéressant de se rendre compte de l'extension de la mer : aucune de toutes ces transgressions et régressions n'est assez dynamique pour occuper l'ensemble du Bassin : quelques golfes atteignent temporairement le centre de la cuvette.

Le Tertiaire est une époque pendant laquelle se succèdent : émergence généralisée, déformation, érosion des terres émergées et retour de la mer suivi de dépôts discordants.

Il faut bien noter ce phénomène important qu'est le facteur érosif. En effet, plusieurs érosions généralisées ont eu lieu durant les périodes de retrait provoquant une baisse du taux de subsidence dans le Bassin. L'épaisseur des dépôts diminue sur certains hauts fonds à moins que la nature des faciès les expose à une érosion facile.

Nous touchons ici à l'histoire sédimentologique du Bassin de Paris caractérisée par des variations importantes d'épaisseur.

Au Tertiaire, le Bassin bascule vers le quadrant nord-ouest coupant définitivement les communications avec le sud-est et l'est d'où étaient venues la plupart des transgressions antérieures. Le rôle de la tectonique intervient à ce moment précis.

## Information

### DIPLÔME D'UNIVERSITÉ « EAU ET SANTÉ »

Faculté de Médecine, Faculté des Sciences Pharmaceutiques de Nancy

**Objectif** : fournir les connaissances d'une approche rationnelle de l'utilisation de l'eau pour l'homme sain et l'homme pathologique, en ce qui concerne les eaux destinées à la boisson, aux loisirs et aux soins.

**Candidats** : Médecins, Pharmaciens, Kinésithérapeutes, biologistes...

**Calendrier** : pour l'année universitaire 98-99 :

4 x 2 jours d'enseignement (11-12 janvier, 01-02 février, 15-16 mars, 17-18 mai 1999) + stage pratique + mémoire à rédiger.

**Inscription** : septembre-octobre 1998.

**Renseignements** : s'adresser à : M<sup>me</sup> Faye : tél. : 03.83.59.25.58 ; fax : 03.83.59.25.61 ou M<sup>me</sup> Braconot : tél. : 03.83.17.88.49 ; fax : 03.83.17.88.19 ou M<sup>me</sup> Kautz : tél. : 03.83.59.25.66 ; fax : 03.83.59.25.88.

### Un Ami nous a quittés

Nous apprenons avec une grande émotion le décès de notre Collègue et Ami, le Docteur Claude LOISY, Gastro-entérologue consultant à Vichy, ancien Président de la Société Française d'Hydrologie et de Climatologie Médicales, membre du Comité de Rédaction de *La Presse Thermale et Climatique*.

Le Docteur Jean Françon, Rédacteur en Chef et le Comité de Rédaction, la Direction de l'Expansion Scientifique Publications, font part de leur profonde tristesse et présentent à la famille du Docteur Loisy leurs vives et sincères condoléances.

## II

# LES AQUIFÈRES DU BASSIN DE PARIS DANS LEURS RAPPORTS AVEC LE LABEL EAU MINÉRALE ET EAU THERMALE

### RÉSERVOIRS PRIMAIRES

#### Saint-Amand-les-Eaux

##### Rappel du cadre géologique

Sous une mince couverture de craie, les sources constituées par des forages foncés à l'emplacement d'écoulements spontanés, captent une production hydrothermale d'origine profonde en connexion avec le bassin houiller carbonifère franco-belge.

Des arrivées d'eau chaude sont connues depuis longtemps dans les travaux miniers ; leur température s'étend de 40 à 53°C. Le réservoir aquifère se trouverait entre 850 et 1 260 m de profondeur.

##### Le patrimoine hydrominéral

• 4 forages anciens ont été foncés en forêt de Raismes à des dates échelonnées, à une distance de 3 200 m de l'établissement. Ils s'inscrivent dans un périmètre de 100 x 40 m.

Profondeur	en m :
Vauban :	36,25,
Naudin :	33,00,
Nouvel Evêque d'Arras :	30,00,
Amanda :	26,00.

- Deux ouvrages dispersés à la périphérie de la Ville :
  - Le Clos : 120,00,
  - Devaux = St Blaise : 123,00.
- 1 forage foncé en 1955 : Vauban 55 : 84,10,
- 1 forage réalisé du 13/01 au 15/02/1962 à 110 m du précédent.

##### Situation géologique

Elle découle de l'examen de la coupe des terrains traversés lors de l'exécution de Vauban 55. Compte tenu des obscurités évidentes qui subsistaient après les interventions antérieures, G. Minoux, J. Ricour et G. Waterlot [38] avaient voulu – avec raison – s'assurer de la situation réelle en procédant à des observations minutieuses. Il s'agissait de la première démarche raisonnable à Saint-Amand.

Sous une couche de remblais divers, la sonde traverse successivement de haut en bas :

- Tourbe : 1,00 m,
- Tourbe sableuse : 0,50 m,
- Sables landéniens 17,10 m,
- Craie turonienne 15,00 m,
- Marbre bleu belge 12,50 m,
- Grande brèche 11,25 m.

##### Situation hydrologique

Les sables tertiaires absorbent les précipitations, ouverts à toutes les nuisances causées par les activités agricoles, urbaines et industrielles. Leur nappe phréatique sera donc fermée après tubage et cimentation.

La craie possède sa propre nappe aquifère. C'est un milieu peu perméable car les actions climatiques périglaciaires lui ont donné un modelé particulier et diminué sa perméabilité par décalcification.

Entre 19 et 58 m, la profondeur de la nappe n'est pas favorable à la perception d'une géothermalité propre.

Or, Vauban 55 produit une eau qui marque 25,5°C au thermomètre. Il faut donc admettre que de l'eau très *géothermale*, ascendante, sous *pression*, se déverse dans la craie et *cède ses calories* à l'aquifère phréatique.

Une telle situation n'est pas exceptionnelle.

TABLEAU I. - Calcul du débit spécifique.

Profondeur en m	Epaisseur en m	Durée du pompage	Débit spécifique m <sup>3</sup> /m/h
0,00	17,60	8 h 25min	6,052
17,60	10,80	7 h	7,520
28,40	5,90	4 h 55 min	13,720
34,30	11,20	8 h 20 min	9,490
45,50	7,50	5 h 50 min	6,250
53,00	10,00	6 h 01 min	6,890
63,00	28,50	3 h 14 min	7,420
85,50			

TABLEAU II. - Analyse de février 1986.

Paramètre saisi	Vauban	Amanda	Orée du bois
Niveau piézométrique au repos (N.G.F.)	+ 20,01	+ 19,50	+ 19,49
pH	6,91	7,02	7,10
Température en °C	24,50	13,90	15,30
Gaz carbonique libre	20,00 mg/l	20,00	20,00
Silice en Si (OH) <sub>4</sub>	33,15 mg/l	31,87	33,54
Résidu sec	1 265,00	1 334,00	1 288,00
	unité : mE/l		
HC03 <sup>-</sup>	4,650	4,790	4,850
SO4 <sup>--</sup>	12,867	13,866	13,429
Cl <sup>-</sup>	1,704	1,760	1,723
F <sup>-</sup>	0,129	0,132	0,137
Ca <sup>++</sup>	11,552	11,801	11,751
Mg <sup>++</sup>	5,428	6,250	5,798
Na <sup>+</sup>	1,889	1,913	1,965
K <sup>+</sup>	0,207	0,215	0,233
Sr <sup>++</sup>	0,091	0,101	0,100
Fe <sup>++</sup>	0,001	0,001	0,001
Mn <sup>++</sup>	0,001	0,001	0,001

### Calcul du débit spécifique

Ce que nous exposons ci-dessus [4] est confirmé par le déroulement des tests de débit mis en œuvre pendant les essais (voir tableau I).

Selon les profondeurs testées, le débit spécifique passe du simple au double, soit 6,052 à 13,72m<sup>3</sup>/h/mètre de rabattement.

La craie est donc parcourue par un réseau de fissures qui débitent des volumes différents sous des températures inégales.

Après homogénéisation, les températures s'uniformisent autour de 25,5°C.

Il est permis d'écrire que le forage saisit l'eau thermique « par les cheveux » et que le gisement réel de l'eau se trouve beaucoup plus bas, à partir de 1 000 m de profondeur, limite avancée à titre indicatif.

Dans le périmètre élargi de Saint-Amand-les-Eaux, des dizaines de fractures doivent débiter de l'eau très géothermale qui se disperse dans la nappe de la craie.

### Hydrogéochimie (tableau II)

- Le sodium n'équilibre pas le chlore des chlorures. L'excès de sodium est à inscrire au compte des hydrogénocarbonates.

- La présence d'hydrogénocarbonate de sodium n'est possible que si le gaz carbonique entretient l'hydrolyse des feldspaths. Cette situation est vérifiée pour : Vauban = 0,179 ; Amanda = 0,153 mE/l.

- Le gaz carbonique agressif excédentaire est titré au jour de l'analyse pour 20 mg/l après transport, ce que confirme le pH situé dans la zone acide, à Vauban 55.

- Dans les limites de 6,91 < pH < 7,10 la silice circule uniquement sous la forme acide silicique : Si (OH)<sub>4</sub>.

### En résumé

La production d'eau thermique s'inscrit à Saint-Amand-les-Eaux dans un contexte pétrographique et structural qui met en jeu :

- la nappe phréatique de la craie ; *passive*, peu minéralisée, homéotherme (+/- 12°C) ;
- des ascendances pressurisées, *actives*, constituées par des eaux de gisement bien connues dans les travaux miniers.

Les secondes rechargent la première, la réchauffent, l'enrichissent.

**Feron**

Les deux sources de Feron (59), entre Fourmies et Avesnes jaillissent à travers une mince couverture crétacée recouvrant les roches primaires du massif ardennais.

Les deux analyses ci-dessous ne sont pas comparables, même à un degré de dilution près.

L'analyse de Tordeux (1809) propose, [citée par 19 et 34 ].

	Fontaine Feron	Grande Fontaine
Carbonate de calcium	180 mg/l	
Chlorure de magnésium et Chlorure de sodium		271 mg/l
Chlorure de sodium		36,5
Sulfate de sodium		61
Sulfate de calcium	8,5	
Sulfate de magnésium	51	
Silice Traces	10	

L'impasse porte sur les bicarbonates. Les deux analyses ne détaillent pas les mêmes postes. L'incohérence de la démarche est regrettable.

**Roches cristallines et volcano-sédimentaires**

Les sources médicinales du petit Saint-Dié

Nous avons réuni 85 références bibliographiques consacrées [40] depuis 1594 aux sources du Petit Saint-Dié, tombées dans l'oubli.

*Piézométrie*

Contrairement aux observations faites à l'occasion de la construction des chambres de captage posées sur un simple grattage du sol afin de ne pas perdre les eaux, il ne s'agit point d'un écoulement *per descensum*, issu du réservoir triasique surélevé, mais d'une arrivée *per ascensum* sous une pression hydrostatique essoufflée (fig. 11, 12).

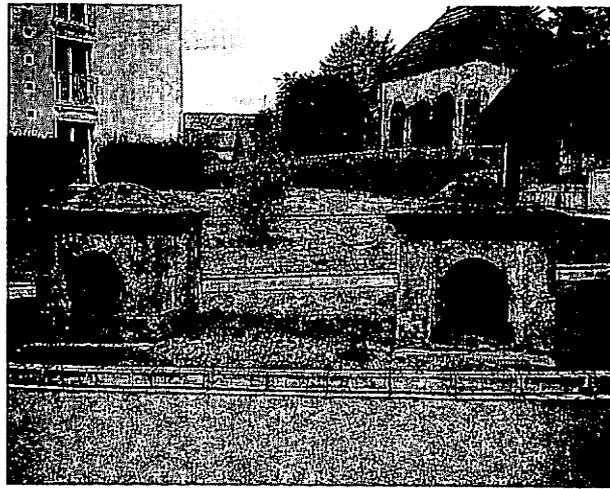


Fig. 11. - Les sources haute et basse du Petit Saint-Dié.

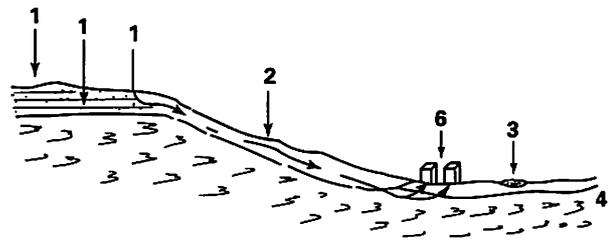


Fig. 12. - Alimentation des sources du Petit Saint-Dié selon Pierrot [40]. Écoulement de la nappe suspendue du Grès vosgien à travers colluvions et éboulis sur les pentes. Mise en charge latérale. Système gravitaire. 1) Précipitations liquides et solides ; 2) Éboulis + colluvions ; 3) La Meurthe, riv. ; 4) Alluvions modernes ; 5) Substratum permien ; 6) Sources haute et basse.

*Géothermalité*

La température de 16°R avait conduit à classer les sources parmi les eaux superficielles exposées aux effets du climat, notamment hivernal.

Une fois corrigé à 20°C, ce classement arbitraire n'est plus acceptable. Par référence à un gradient géothermique standard, la température de l'eau est celle d'un émetteur situé à partir et au-delà de 330 m de profondeur. Cette valeur doit être corrigée à nouveau, majorée de la perte calorifique due à la détente du gaz carbonique, génératrice de frigories.

*pH*

Mesuré à 6,4, la réaction est franchement acide, induite par le gaz carbonique libre, excédentaire, agressif.

### Cations et anions

Présentée sous une forme inintelligible, l'analyse ionique informe seulement sur la minéralisation globale : faible, bicarbonique et sulfatée.

### Caractère ferrugineux

L'allusion à la présence de crénate de fer signifie que le métal est chélaté sous forme hydroxylée à une substance organique : acides humiques, muco-glycoprotéines dont la décomposition par d'autres bactéries conduit à la libération du fer réduit ( $Fe^{2+}$ ) et sa précipitation à l'air libre sous forme hydroxylée ( $Fe^{+++}$ ).

Le caractère ferrugineux est secondaire, lié à la rupture de l'état réducteur au contact de l'air.

### Sulfuration

La présence d'hydrogène sulfuré a été citée à plusieurs reprises, considérée comme une contamination de proximité. Il n'est pas impossible qu'il s'agisse au contraire d'un caractère hérité de la présence en profondeur, et en tous cas au-delà de 600 m, de matériel d'âge carbonifère, plus précisément dévono-dinantien. Des exploitations existaient dans le passé à La Fosse, Colroy, dans la proximité de Saint-Dié. Un dosage de la sulfuration *in situ* s'impose, confirmant ou infirmant les données bibliographiques précaires.

### Les gaz thermaux

Ce point particulier avait été bien appréhendé, mais son interprétation est inadmissible.

La seule source des gaz évoqués est le socle granitique : il forme le soubassement de la cuvette hercynienne de Saint-Dié. Le socle est très largement fracturé : nous avons précisé (p. 86, supra) que le centre volcanique de Moyenmoutier-Senones-Saâles était très actif et très étendu. Au rebord de la cuvette subsidente de Saint-Dié, les fractures disposées en relais collectent les gaz thermaux et canalisent leur évaporation (fig. 13).

Le radon est le dernier descendant de la désintégration de la famille de l'uranium. Son gisement est encore le socle granitique. Ces deux gaz sont les moteurs ascensionnels des eaux profondes poussées par la détente du gaz carbonique.

### Conclusion sur les sources médicinales du Petit Saint-Dié

Bien que tombées en l'état d'abandon, ces émergences ne manquent pas d'intérêt du point de vue de la structurologie régionale : jaillissantes au bord d'un effondrement délimité par de nombreuses fractures recouvertes par des colluvions climatiques, à peine géothermales, carbo-gazeuses, faiblement minéralisées, elles méritent bien le label « minérales ».

Une prospection géophysique étendue, des sondages de contrôle, sont des opérations préliminaires qui, avec patience et sous réserve de compétence, permettraient

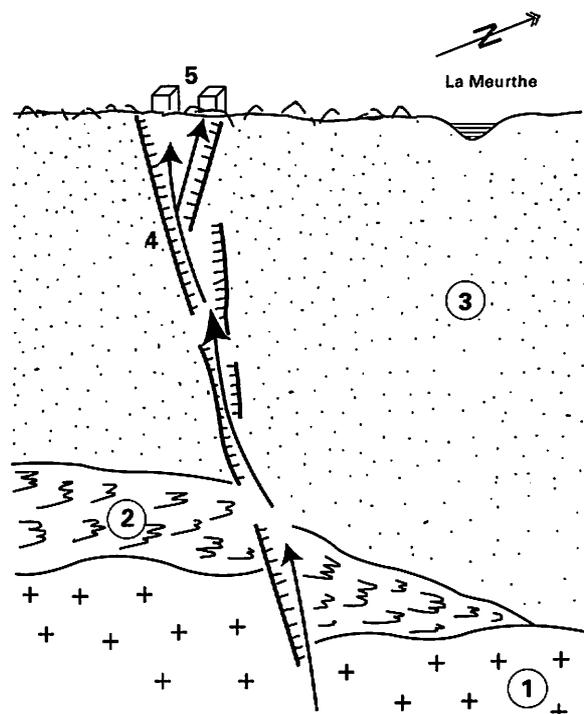


Fig. 13. - Notre interprétation, tenant compte des paramètres analytiques : 1) substratum granitique ; 2) matériel carbonifère dévono-dinantien ; 3) grès permien ; 4) faille bordière et son cortège ; 5) sources haute et basse ; 6) alluvions et déblais superficiels.

de les capter dans leur gisement profond à l'abri de toutes les influences horticoles, péri-urbaines et industrielles qui constituent leur environnement actuel.

### Le rebord du Morvan

#### Les fontaines salées à Saint-Père-sous-Vezelay

La construction de la basilique de La Madeleine à Vezelay d'où saint Bernard prêcha la II<sup>e</sup> croisade est la réoccupation d'un habitat humain beaucoup plus ancien. Dès l'âge du fer, une population celtique s'était groupée à proximité de sources salées dont l'importance était considérable si loin des côtes, du Jura, de la Lorraine et de ses briquetages.

#### Les captages de l'âge du fer

Il s'agit d'une série de 9 puits disposés en cercle. Ces ouvrages nous donnent une bonne leçon de technologie. En effet, creusés dans la plaine alluviale d'une rivière toute proche, la Cure, nos lointains prédécesseurs avaient compris que les eaux phréatiques se mêlaient à d'autres eaux, plus profondes, très salées.

Afin d'éviter le mélange des deux aquifères, les sourciers avaient conçus un blindage constitué d'un fourreau taillé dans un tronc de chêne évidé par carboni-

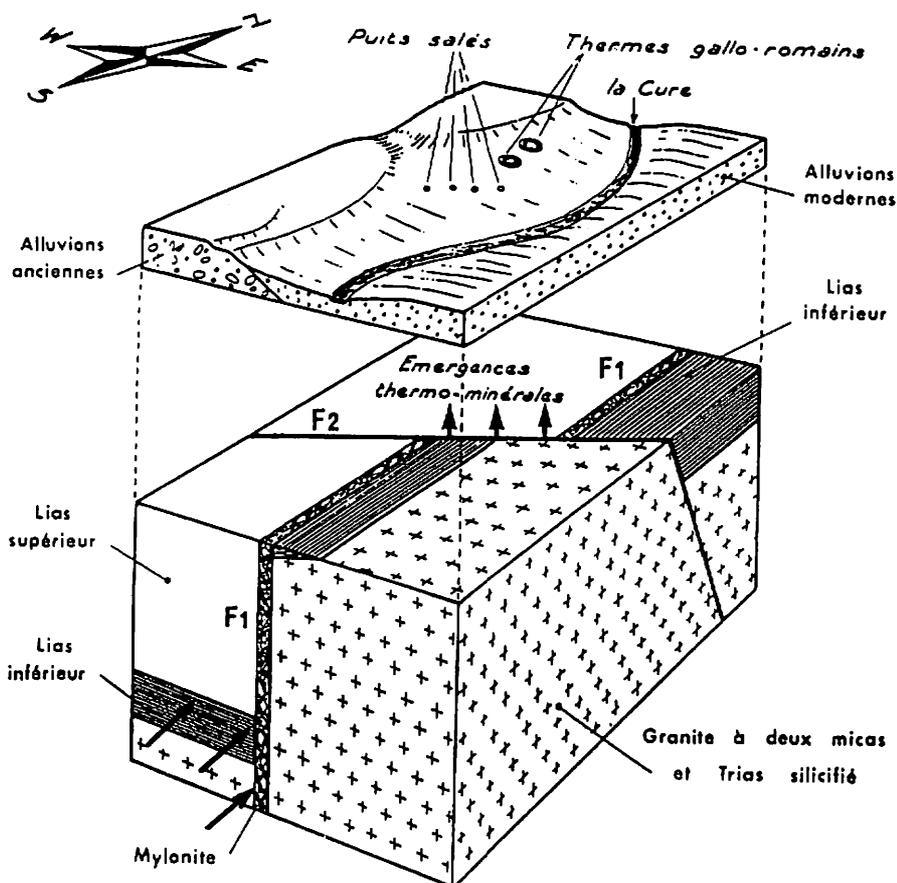


Fig. 14. - Bloc-diagramme schématique du secteur des Fontaines Salées (d'après Cl. Megnier, 1964). Les alluvions ont été décollées du substratum pour mettre en évidence les contacts géologiques sous-jacents. F1 faille principale, F2 faille secondaire. Les flèches indiquent le sens des circulations aquifères.

sation, ce qui donnait au bois un brevet d'imputrescibilité. Si nous nous reportons 3 500 ans en arrière, cette anticipation des opérations de tubage-cimentation était simplement prophétique.

Une fois mise en place dans la fouille, la garniture en bois devait sans doute avancer par havage pendant qu'un aide creusait de l'intérieur, sous le couteau biseauté de la gaine.

### La structure

Abordée par plusieurs auteurs, l'interprétation de Horon et al. [36] est la plus convaincante (fig. 14).

Un panneau de granite recouvert d'une mince couverture de Lias est cassé par failles :

- l'une d'elles est en *compression* ; un matelas de mylonite montre que le coulisage d'un panneau a été suivi par l'écrasement de la zone de contact ;

- la seconde faille est en *extension* ; elle abaisse un autre panneau et conduit les eaux minérales salines à l'émergence.

Ce schéma n'entraîne pas tout à fait la conviction parce que l'auteur propose un complexe : granite-trias silicifié qui est franchement impossible à concevoir.

Dans le voisinage, nous connaissons des carrières de granite exploité pour ballast, coiffé par le Rhétien lumachellique et calcédonieux. Le Trias ne peut être salifère dans de telles conditions.

Il faudrait rechercher dans la présence du sel gemme dissous, une signature très profonde, volcanogène ; ce qu'il faudrait démontrer. L'incertitude et le doute qui sont les nôtres sont une incitation prometteuse. Qui osera ?

### Hydrogéochimie

Contrairement à toute attente, la connaissance des eaux de Fontaines Salées reste très sommaire. Cet handicap tient à la démarche des auteurs : faute de moyen financier pour faire exécuter une analyse soignée qui n'intéresserait personne au plan commercial, les intervenants ont pratiqué des tests hâtifs avec le matériel du petit chimiste amateur.

Les résultats sont rendus dans un étrange langage, les valeurs étant données avec 3 chiffres au-delà de la virgule...

Paramètre dosé :	Expression du résultat :
Ca <sup>++</sup>	chaux CaO
Mg <sup>++</sup>	magnésie MgO
Alcalinité	chaux CaO
Cl <sup>-</sup> et Na <sup>+</sup>	sel de cuisine

### La Salinité

Les sources salées méritent bien leur nom.

Les gabeloux se sont intéressés à toutes les sources salées du Morvan, les ont murées ou les ont empoisonnées pour en interdire l'usage.

La salinité ne relevant pas directement d'un Trias indifférencié et superficiel qui devrait être lessivé depuis longtemps, il convient de se tourner vers une origine très profonde, au plancher de la croûte.

Il y a vingt années, une telle hypothèse de travail aurait entraîné des réactions traduisant un très grand doute.

Pourtant, dans les années 1975, un forage poussé dans le socle granitique à 750 m en Forêt-Noire (Bad Liebenzell), traversait une fissure débitant une eau salée à 15 g/l, preuve que dans un massif cristallin étendu il est possible de rencontrer des saumures riches en évaporites hors de tout contexte sédimentaire des faciès lagunaire.

### En résumé

Les sources salées du Morvan offrent l'opportunité d'une incitation à entreprendre un programme de recherches orienté vers l'origine de NaCl.

La surélévation du Massif central à son apophyse septentrionale, son morcellement en parallélépipèdes basculés en tous sens sont les motifs qui nous incitent à proposer d'entreprendre un programme de haute technologie orientée sur l'origine du sel.

### Rebord du Massif Armoricain

#### Bagnoles-de-l'Orne

#### *L'occupation du site*

Une présence humaine installée à proximité des sources est attestée par la découverte d'une industrie

néolithique. Les Romains ont, eux aussi, laissé des traces de leur passage : poterie sigillée, monnaies impériales.

Il faut attendre 1666 pour trouver mention de Bagnoles, dérivé du toponyme bas-latin Balneum, et d'un regain d'intérêt porté aux sources. Tout est relatif ; l'installation historique aménagée sur la rive gauche de la Vée (riv.) ne comportait qu'une loge montée sur quatre fourches, garnie de paille et de bruyère.

La station prend forme au XVII<sup>e</sup> ; au XIX<sup>e</sup>, elle est fréquentée par les altesses et jouit de nos jours d'une respectable considération.

#### *La ressource thermique*

En 1910, un premier sondage remplace la source naturelle [28]. Profond de 102 m, il ne touche pas le granite qui aurait pu être atteint vers 105 m.

Plus tard (1963) un autre ouvrage est mis en place. Le granite est reconnu à 40 m seulement.

Il est clair qu'un accident tectonique passe entre les deux ouvrages et que la fracturation associée a favorisé l'éruption de la source historique.

#### *Composition physico-chimique [39]*

##### • Caractères physiques :

– géothermalité : la température de 24,4°C conduit à situer vers 425-430 m de profondeur le gisement producteur. Cette estimation doit être corrigée à cause de l'influence de plusieurs facteurs : décompression du CO<sup>2</sup> génératrice de frigories ; influence des infiltrations pluviales et nivales.

– Mesuré sur place, pH = 4,58 est l'indicateur d'une eau acide très peu minéralisée, privée de pouvoir-tampon.

– Résistivité : 15 395 ohm/cm ; elle confirme un large déficit d'agents minéralisateurs. Par comparaison l'eau de pluie marque 50 000 ohm/cm.

Alcalinité avant marbre (CaO) : 1 mg/l. Alcalinité après marbre : 34 mg/l.

L'agressivité de cette eau vis-à-vis des canalisations métalliques est confirmée. Gaz carbonique libre, agressif : 48 mg/l ; Gaz carbonique dissout.

##### • Bilan ionique : tableau III.

TABLEAU III. - Composition de l'eau minérale à Bagnoles-de-l'Orne

Cations	mg/l	me/l	Anions	mg/l	me/l
Ca <sup>++</sup>	1,50	0,075	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,18	0,035
Mg <sup>++</sup>	0,50	0,041	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	11,2	0,280
Na <sup>+</sup>	7,05	0,306	Cl <sup>-</sup>	10,00	0,280
K <sup>+</sup>	2,20	0,056			
s/total	11,25	0,478	s/total	23,38	0,595
Minéralisation totale				34,63	

- Gaz thermaux.

– Le gaz carbonique, dans la mesure où il dégage de façon régulière ce qui n'est pas le cas général, est titré à 48 mg/l. Ce gaz est produit par le socle granitique.

– L'azote qui figure dans toutes les analyses anciennes, est le fait d'une inadéquation de la prise d'échantillon.

• La Silice est évaluée entre 13 et 17 mg/l selon les laboratoires intervenants. Relativement abondante, corrigée d'un coefficient multiplicateur ( $x = 1,28$ ) elle représente la silice mise en circulation par l'hydrolyse des feldspaths plagioclases. La kaolinite, minéral procédant de l'altération des feldspaths dépose sous forme de draperies concrétionnées dans l'espace fissural distendu (échantillon, collection Labo. Hydrol.).

### En résumé

Bagnoles-de-l'Orne ne s'inscrit pas exactement dans le bassin sédimentaire parisien. Cette localité entre dans le cadre des plis de direction armoricaine.

Les couches sédimentaires appartiennent aux formations les plus anciennes de l'ère primaire : âge silurien.

L'eau minérale traverse les Grès armoricains sans y trouver une charge minérale appréciable. Issue essentiellement du socle, carbo-gazeuse, très peu minéralisée, il est normal de constater une acidité élevée soutenue par un abondant dégagement de gaz carbonique. La courbe d'équilibre calco-carbonique signe une eau agressive vis-à-vis des canalisations métalliques.

La richesse en acide silicique ne semble pas avoir été suffisamment prise en considération.

### Château-Gontier

Émergentes au pied d'un escarpement formé de schistes antécambriens, les sources de Château-Gontier ont fait l'objet d'une attention soutenue dès le XVI<sup>e</sup> siècle.

Plus tard, deux voûtes ont été creusées et appareillées de cuvelages disposés selon l'usage de l'époque.

En 1966, il est apparu aux Élus que cette eau était promise à un brillant avenir.

D'une visite effectuée en 1973, suivie par une étude approfondie au plan des conditions d'émergence et de la composition physico-chimique appréhendée sur place, nous retiendrons :

- une ascendance hydrominérale carbo-gazeuse essoufflée traverse sous-pression le flux sous-alluvial et s'équilibre à +/-2m au dessus du niveau moyen de la Mayenne ;

- point de nappe, mais une circulation aquifère qui se disperse en une pluralité de filets d'eau dans le reticulum fissural et diaclasique ;

- la ville historique en surplomb est une menace permanente envers l'état sanitaire des sources qui reçoivent directement, *per descensum* le produit des fuites des réseaux urbains : distribution et assainissement ;

- la composition chimique est celle d'une eau de socle : acide, bicarbonatée et faiblement sulfatée.

La teneur en fer (> 10 mg/l) est incompatible avec les normes de solubilité de ce métal. Les griffons sont colonisés par des sidéro-bactéries mucilanogènes qui chélatent le fer et autorisent la constatation de concentrations hors normes.

L'avenir réel de ces sources est purement historique. Dans le cadre de la conservation du patrimoine, elles méritent d'être entretenues et de servir de base pour l'installation d'une végétation des lieux humides sous les voûtes : bryophytes, hépatiques, capillaires de Montpellier, fougères diverses dont la rue des murailles, etc.

Le service des promenades-parcs et jardins est tout à fait compétent pour intervenir *es qualité* sur le site et le sauvegarder.

## RÉSERVOIRS TRIASIQUES

### L'aquifère des grès vosgiens *sensu stricto*

#### Géométrie de l'aquifère [15]

Bien que les grès dessinent une auréole circulaire au rebord extrême du bassin de Paris, ils ne forment pas une couche régulière tapissant le support hercynien sur lequel ils ont été déposés.

- *Au rebord* des crêtes vosgiennes, le chevelu hydrographique dissèque un plateau élevé en une multitude d'îlots suspendus d'où s'écoulent un grand nombre de sources servant à l'alimentation des communes implantées en fond de vallée.

- *Ailleurs*, le Grès vosgien est une unité pétrographique assez homogène s'étendant de Langres à Luxembourg, et du Donon à Bar-le-Duc. L'épaisseur (fig. 18) maximale de 350 m diminue dans toutes les directions, venant s'appuyer sur les seuils de Luxembourg ou de Bourgogne.

#### Piézométrie (fig. 15)

La nappe ne s'écoule pas vers le centre du bassin de Paris, contrairement à une opinion admise sans fondement, mais selon une direction méridienne, sud-nord.

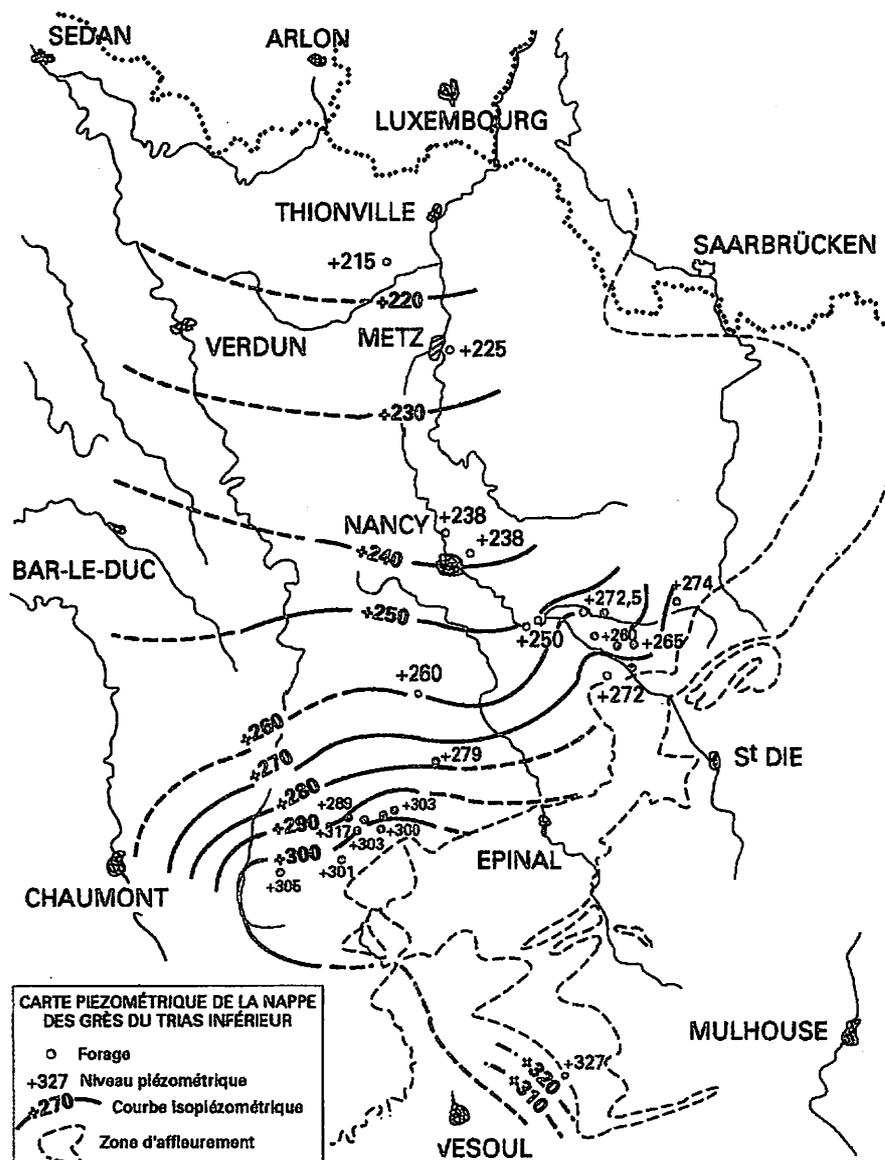


Fig. 15. - Carte piézométrique de la nappe des Grès du Trias inférieur : + 235 cote N.G.F. de la nappe libre ; 300 courbe isopiézométrique ; zone d'affleurement des Grès ; zone de soutirage par l'exploitation de la houille.

Sur le haut-plateau délimité entre Darney, Épinal et Plombières, les reliques de Grès respecté par l'érosion glaciaire sont des aquifères perchés et suspendus, isolés du reste de la nappe proprement dite. Ils ne sont pas pris en compte sur l'illustration présentée.

L'aquifère continu s'équilibre au plus haut un peu au dessus de 300 m NGF. Il s'abaisse à 215 m entre Metz et Thionville. La dénivelée est de 85 m (fig. 16).

#### Transmissivité

Il s'agit d'une expression indirecte de la perméabilité. Estimée à  $10^3$  m/s elle peut être assimilée à un déplacement de l'ordre de 0,30 m/j.

Entre le Donon et Nancy, un délai de 23 000 ans sépare les moments de l'infiltration et de l'émergence.

#### Cimentation des Grès

Les grains de quartz des Grès vosgiens sont liés par un ciment fragile constitué par des hydroxydes de fer : limonite, hématite et Goethite (découvert par W. Goethe, littérateur qui avait soutenu un doctorat de minéralogie à l'Université de Heidelberg). Des recristallisations aboutissent au fer spéculaire : l'oligiste, curiosité minéralogique abondante sous forme de cristallisations fissurales.

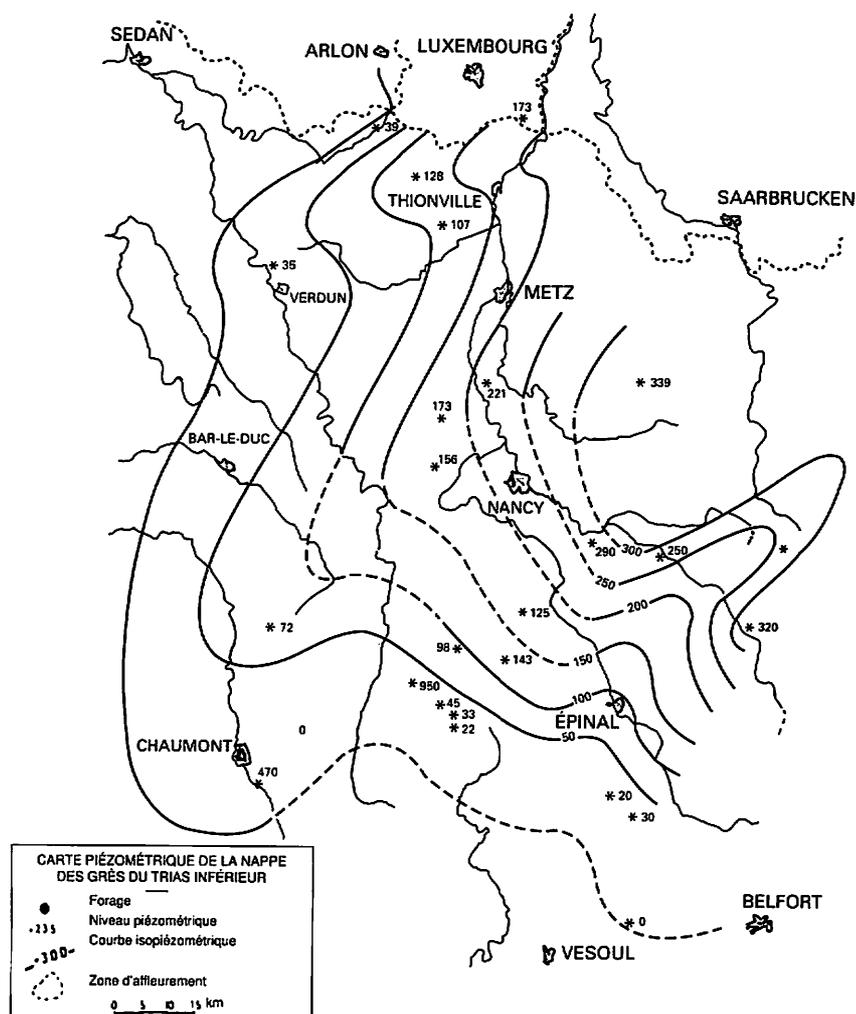


Fig. 16. – Carte en courbes d'égal épaisseur des Grès du Trias inférieur. Isopaches de 50 m.

À grande profondeur, vers 1 000 m à Nancy, la base du grès est empâtée par de l'argile, des oxydes de fer et de manganèse. La perméabilité est « fermée », les capacités aquifères très pauvres, sinon nulles.

À proximité des régions de biseau stratigraphique, les grès indifférenciés sont fortement minéralisés :

- cristaux de gypse et trémies centimétriques de sel gemme à Chezeaux ;
- ciment gypseux à Mondorf au Grand Duché ;
- oxydes de fer à Bois Chaté.

#### Minéralisation de l'aquifère

- Les Grès sont à découvert : l'eau produite est hypominéralisée, acide, agressive. Les risques de saturnisme sont majeurs.

- Les Grès sont recouverts par d'autres sédiments triasiques : l'aquifère acquiert une minéralisation équilibrée et produit une eau potable de bonne qualité alimentaire.

- Les Grès sont recouverts par le Muschelkalk moyen : la présence, dans le synclinal de Sarreguemines d'un gisement de sel gemme qui s'avance jusqu'aux portes de Nancy, induit un surcroît de minéralisation sulfatée et chlorurée (fig. 17).

- Lorsque la couverture sédimentaire comprend le Keuper salifère, et que le sel du Muschelkalk n'est plus représenté, la diffusion à distance des sulfates et des chlorures est quand même très marquée.

- Le Grès vosgien produit une eau qui peut encore être qualifiée de potable jusqu'au rebord méridional de l'anticlinal : Bar-le-Duc – Pont-à-Mousson – Sarrebruck.

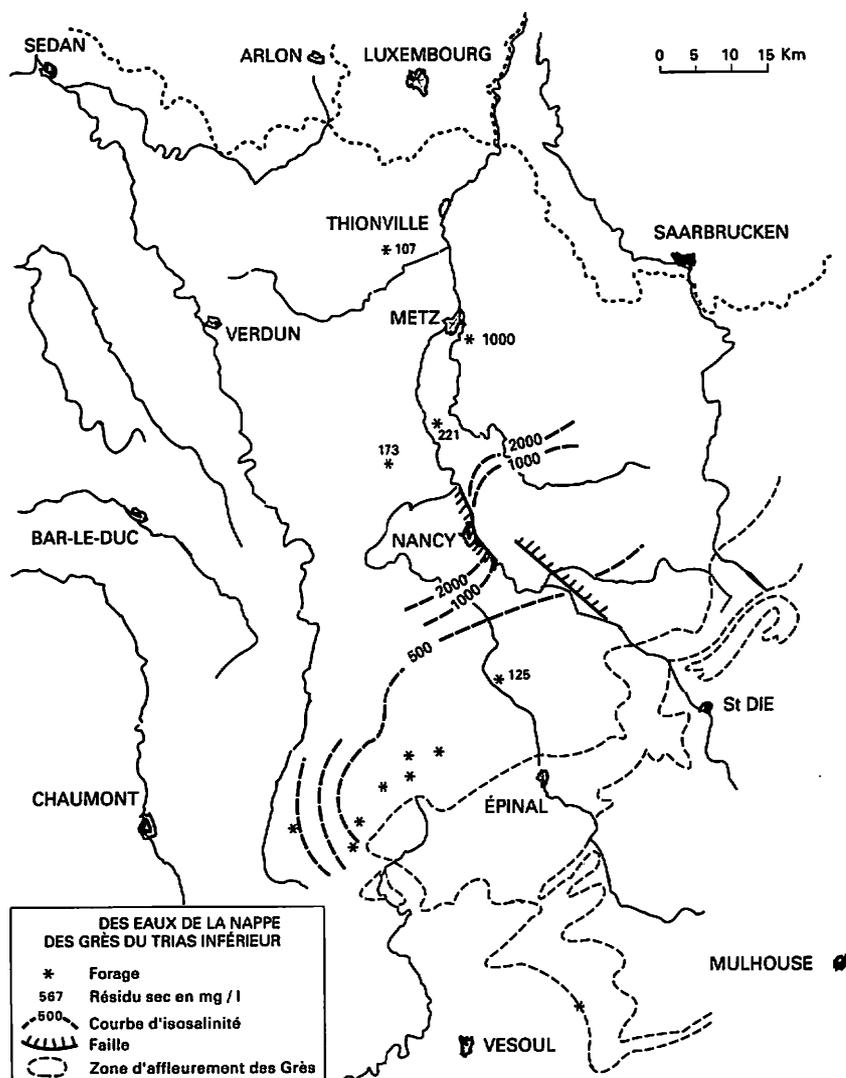


Fig. 17. – Minéralisation des eaux de l'aquifère des Grès du Trias inférieur.

- Au nord de cet accident, la minéralisation augmente rapidement. Les eaux ne sont plus *potables*. La charge atteint 8 g/l à Metz de sorte qu'elles ne sont même plus *minérales*. À proximité du biseau Nord de la formation gréseuse, la minéralisation s'élève à plus de 22 g/l. Il s'agit d'eau connée, retenue dans le piège stratigraphique depuis l'époque de son infiltration.

- À Nancy, l'exploration par carottage de la base du Grès vosgien, les diagraphies électro-nucléaires, le pompage sous packer par tranches isolées de 10 m ont montré que :

- la minéralisation augmente brutalement avec la profondeur,

- il n'y a pas intérêt à approfondir exagérément un ouvrage,

- le débit supplémentaire obtenu apporte des eaux hypersalines, très chargées en hydroxydes métalliques.

#### Kontz-les-Bains et Sierck-les-Bains

Les deux localités jumelles sont établies sur les rives droite et gauche de la Moselle à l'endroit où la rivière franchit par faille l'anticlinal du Hunsrück dont les quartzites ont fourni des pavés pour la plupart de nos chaussées.

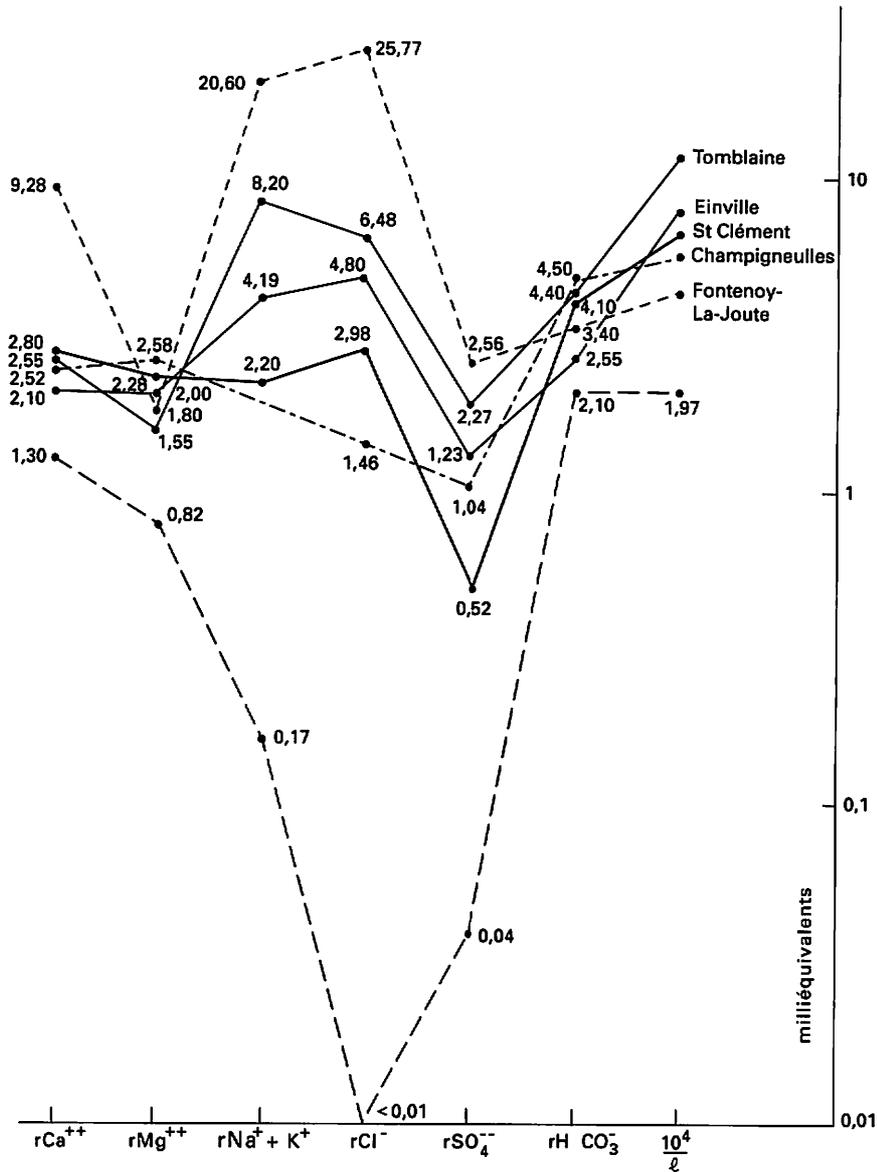


Fig. 18. - Diagramme semi-logarithmique. Évolution hydrogéochimique sous couvertures contenant : un gisement d'évaporite : Manonvillers, Einville, Saint-Clément, deux gisements superposés d'évaporites : Tomblaine, Champigneulles.

Aux portes du défilé emprunté par la Moselle, le cortège des failles majeures ont permis des émergences d'eau à peine géothermales, mais très minéralisées. Les sources historiques ont été remplacées à Kontz par un forage exécuté en 1970.

L'ouvrage traverse la base du système gréseux triasique aminci. Il touche le socle primaire à 90 m de profondeur. Comme il était prévisible d'après la synthèse de Ph. Dague, la minéralisation totale approche 20 g/l.

Situation normale dans un biseau stratigraphique (tableau IV).

Le gaz carbonique dosé sur place s'élève à 325,8 mg/l.

Les quartzites n'étant pas des roches feldspathiques, le gaz thermal n'alimente pas d'hydrolyse, d'où l'absence de bicarbonate de sodium dans le patrimoine géochimique de cette eau.

En résumé

L'aquifère des Grès vosgiens possède les caractères d'une vraie nappe aquifère : espace tridimensionnel infini et continu.

À la périphérie du bassin et en altitude moyenne, des vallées ouvrent de larges et profondes entailles dans la formation gréseuse qui est disséquée. Les lam-

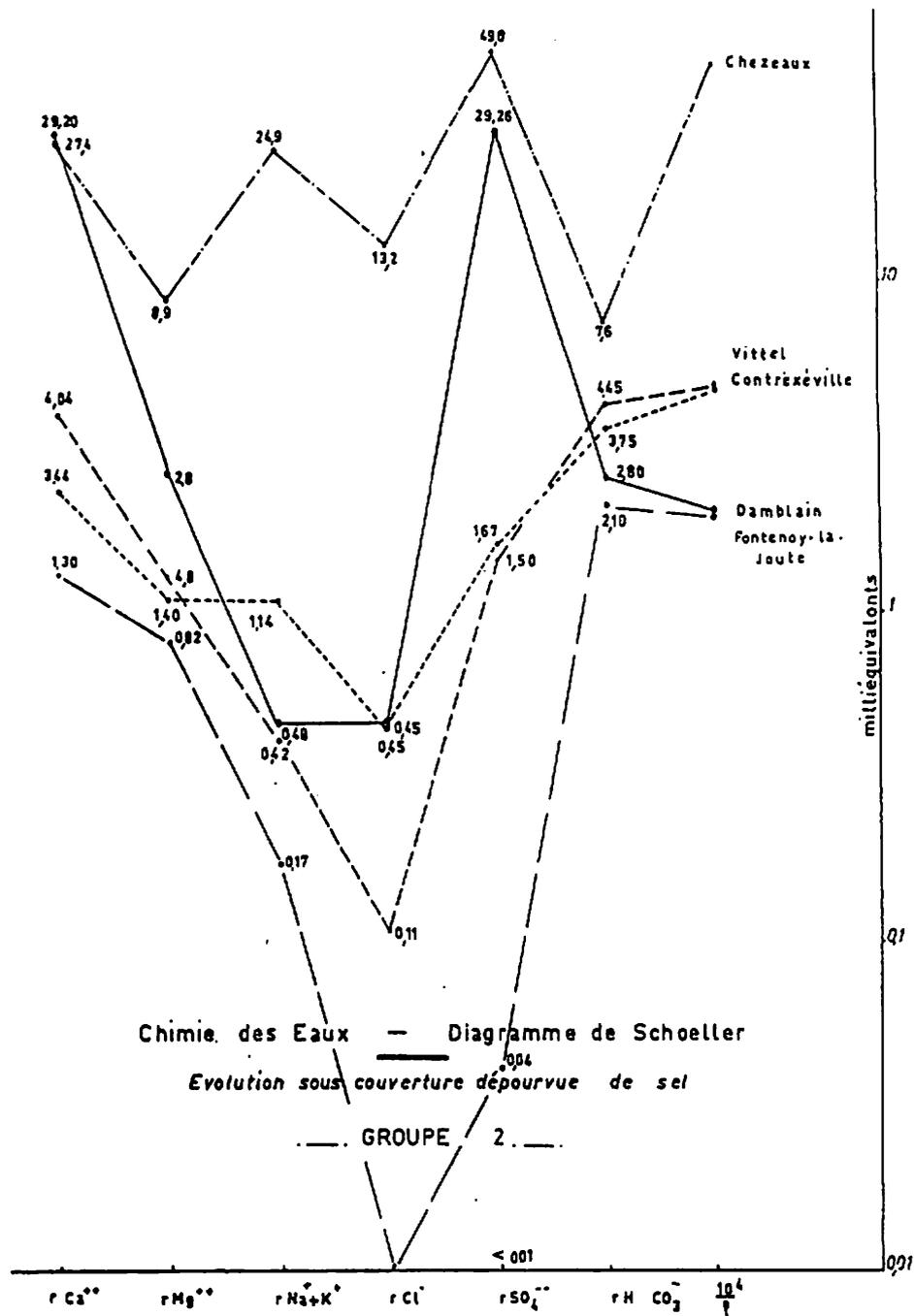


Fig. 19. — Diagramme semi-logarithmique. Hydrogéochimie des forages sous couverture sédimentaire dépourvue de gisement d'évaporites.

beaux alimentent des sources très peu minéralisées, agressives, qui ne compensent pas les fuites physiologiques en cations.

La charge minérale augmente progressivement avec l'importance du recouvrement sédimentaire ; les bicarbonates équilibrent l'agressivité.

La minéralisation augmente de façon excessive aux approches de l'anticlinal sarro-lorrain : chlorures et sulfates atteignent une concentration en rapport avec le label « minéral ».

Au-delà de Metz, tant en direction du NE que du NW, la minéralisation des biseaux stratigraphiques est

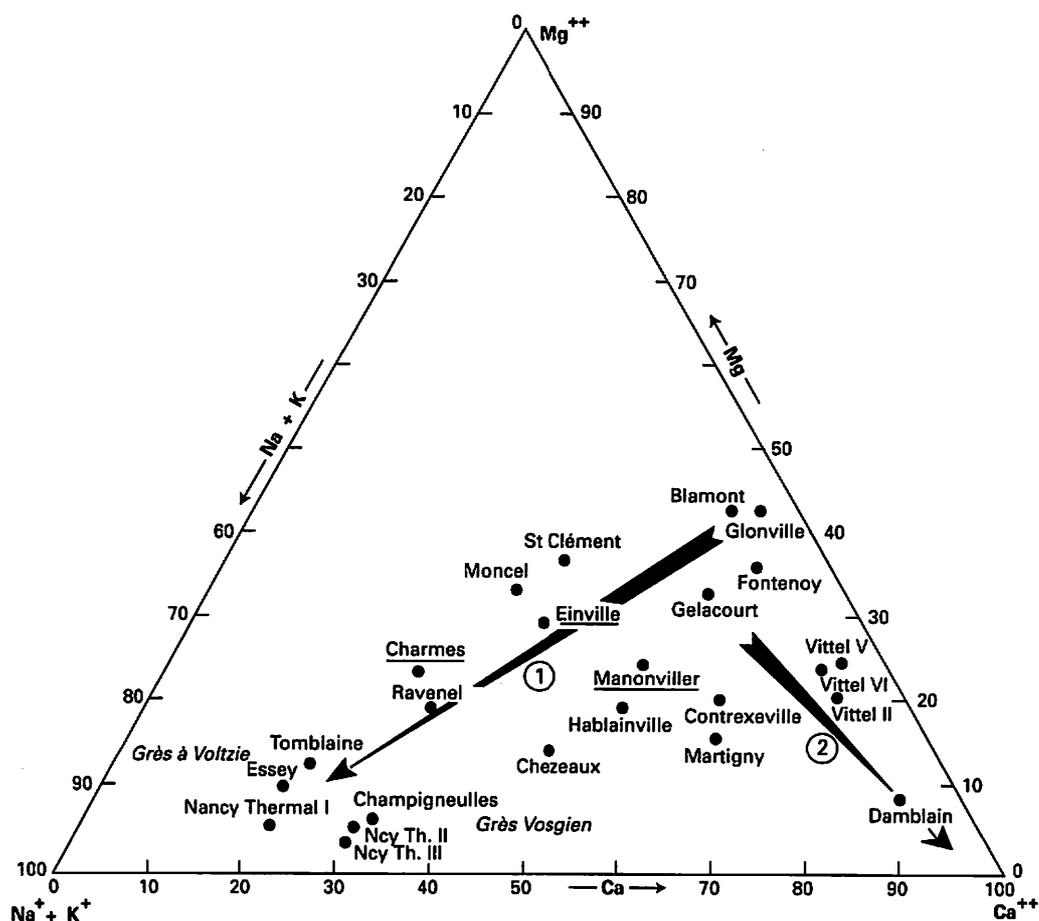


Fig. 20. - Diagramme triangulaire Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>. Évolution de la concentration en cations selon la distance aux affleurements. Différenciation selon l'existence ou l'absence de dépôt d'évaporites.

TABLEAU IV. - Situation normale dans un biseau stratigraphique (Analyses du 1/9/1973).

Kontz-les-Bains	Ancienne source St-Jérôme		Nouvelle source St Jérôme	
	mg/l	mE/l	mg/l	mE/l
Résistivité 20°C	72 ohms/cm		41,3 ohms/cm	
Conductivité uS	13 882,00		24 213,00	
pH corrigé 20°C	6,90		6,10	
TAC N/50	28,50		29,20	
Température °C			14,60	
HC03 <sup>-</sup>	173,80	2,85	178,10	02,920
SO4 <sup>=</sup>	465,30	9,69	538,90	11,237
Cl <sup>-</sup>	6 780,50	191,00	10 108,00	286,760
F <sup>-</sup>			1,76	0,061
NO2 <sup>-</sup>	néant			
NO3 <sup>-</sup>	traces			
Br <sup>-</sup>	159,00	1,99	135,500	1,696
AsH4 <sup>-</sup>			,031	0,001
Ca <sup>++</sup>	1 201,70	60,085	1 695,00	84,750
Mg <sup>++</sup>	130,80	10,765	201,50	16,584
Na <sup>+</sup>	2 993,40	130,148	4 405,00	191,521
K <sup>+</sup>	165,90	4,243	123,00	03,146
Fe <sup>++</sup>			9,20	0,329
Mn <sup>++</sup>			0,70	0,025
Pb <sup>++</sup>			0,11	0,001

proche de celle de l'eau de mer. Exemples : forage de Bois-chaté, sources de Kontz et Sierck-les-Bains.

Au sud, dans la proximité du seuil morvano-vosgien, la situation du forage de Chézeaux est comparable : sursaturation en sulfates, cristallisation de trémies de sel dans le ciment des grès.

La nappe des Grès triasiques et notamment des Grès vosgiens offre une palette très large de toutes les formes (bicarbonatée, sulfatée, chlorurée) et toutes les concentrations (hypo- à hyperminéralisée) qui font de cet aquifère un modèle hydrogéologique remarquable au sein duquel la circulation de l'eau est conditionnée par la perméabilité, la densité et l'infiltration.

Il n'empêche que, malgré les dimensions du réservoir, la multiplication des prélèvements par forage doit être envisagée avec prudence afin de préserver le capital « eau » qui ne peut être consommé plus rapidement qu'il n'est réalimenté par les voies naturelles.

### L'aquifère des grès à *Voltzia heterophylla*

Les sources dont le grès à *Voltzia* est le réservoir, alimentent des dizaines de localités rurales en eau potable. L'adduction, gravitaire dans le plus grand nombre de cas, aboutit aux traditionnelles fontaines publiques monumentales.

Le grès étant consolidé par un ciment calco-magnésien, l'eau traversière proche de l'équilibre calco-carbonique est de bonne qualité physico-chimique. La protection de la forêt garantit une bonne qualité bactériologique.

Il existe cependant une exception dans ce tableau idyllique : le forage de Chênevières (54).

En 1957, la base aérienne devait être alimentée par un forage conçu par l'autorité militaire canadienne. Arrivée à 250 m de profondeur, la sonde libérait une venue d'eau éruptive et sulfurée [13].

Après une intervention dans l'urgence et l'exécution d'un carottage de contrôle, nous constatons que la formation classique gréseuse était remplacée par une argile noire criblée de microcristaux de pyrite, chargée de débris végétaux, notamment de bois finement divisé.

### Interprétation

Le site de Chênevières se trouve à l'aplomb d'une structure hercynienne synclinale encadrée par les rides antiformes de Saint Clément à l'ouest et Flin à l'Est (fig. 21). Pendant le Buntsandstein, cette dépression était drainée par un cours d'eau à régime torrentiel apportant avec du sable fin, des matériaux arrachés pendant les crues au couvert végétal de l'arrière pays.

Une macération en milieu confiné et réducteur s'installait dans les bras-morts. Le milieu saumâtre est attesté par une faune de crustacés : *Estheria*, et de mollusque : *Lucina* [48]. Un enfouissement rapide, un milieu peu perméable sont les facteurs qui ont permis de conserver le gaz de fermentation : hydrogène sulfuré.

Malgré le grand nombre de carrières ouvertes dans le Grès à *Voltzia*, aucun autre exemple de chenal comblé et carbonisé n'était connu jusqu'au jour de la mise en œuvre de ce forage.

### Production hydrominérale du Muschelkalk

#### Forbach

Cette ville du département de la Moselle est alignée dans l'axe du synclinal de Sarreguemines, unité structurale du Bassin de Paris contenant le plus ancien et le plus profond gisement de sel gemme, dans la subdivision moyenne du Muschelkalk.

Une source minérale sulfurée est connue depuis le 19<sup>e</sup> siècle.

Nous citons le compte rendu d'analyse effectuée par O. Henry [25] :

Température	17,5 °C
Carbonates de chaux et de magnésie	320 mg/l
Sulfate de sodium	300
Sulfate de calcium	150
Chlorure de sodium	5 420
Chlorure de potassium	12
Chlorure de magnésium	160
Alumine + Fer + Mat Org.	130
Total :	6 480

Hydrogène sulfuré : débit important.

L'interprétation de ce document appelle les commentaires suivants :

1) la température indique un gisement vers 200 m de profondeur ;

2) la partie terminale du dépôt réunit une forte concentration de minéraux tels que la Polyhalite et des sels hygroscopiques qui marquent la fin de l'épisode évaporitique et l'assèchement de la lagune : sulfate de sodium et chlorure de potassium s'inscrivent dans ce cadre ;

3) la sulfuration de la source, décrite comme étant importante, est, par contre difficile à interpréter. Il n'est pas impossible de faire un rapprochement avec le remplissage de chenal observé à Chênevières (cf. supra. ), à moins que, seconde hypothèse, le gaz ne provienne du houiller sous-jacent.

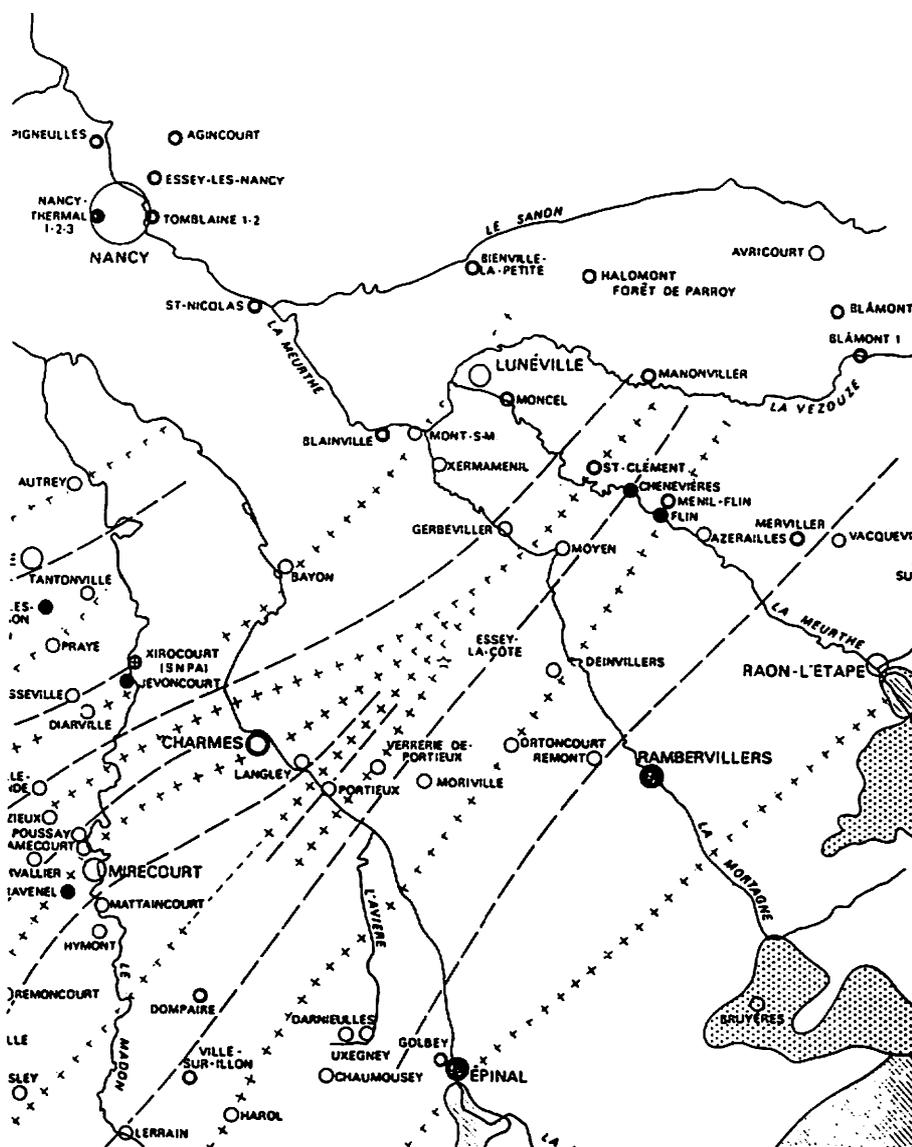


Fig. 21. – Le synclinal de Chènevières encadré par les axes antiformes de Saint-Clément et de Ménéil-Flin (d'après R. Laugier, 1964, planche B).

### Nappes aquifères du Muschelkalk supérieur

#### *La dissolution directe*

Minéraux concernés :  $\text{CaSO}_4$  anhydrite ;  $\text{CaSO}_4$ , 2  $\text{H}_2\text{O}$ , gypse ;  $\text{MgSO}_4$ , 7  $\text{H}_2\text{O}$ , sel d'Epsom ;  $\text{NaSO}_4$ , 10  $\text{H}_2\text{O}$ , sel de Glauber ;  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , sel de Duobus, sel de Glaser.

L'anhydrite est écarté de notre propos : il est insoluble, sauf dans une saumure. Les sulfates de sodium

et de potassium ne se rencontrent que dans un contexte désertique, sous forme de croûtes d'évaporation.

Le gypse par contre, joue un rôle actif dans la minéralisation des eaux du Muschelkalk. Sa solubilité peut s'élever jusqu'à 3,14 g/l, valeur qui n'est jamais constatée.

La dissolution directe concerne les calcaires à *E. liliiformis* dont le ciment est en partie sulfaté. Elle concerne aussi les parties les plus profondes des calcaires à *Ceratites* truffés de micro-filons de gypse fissural.

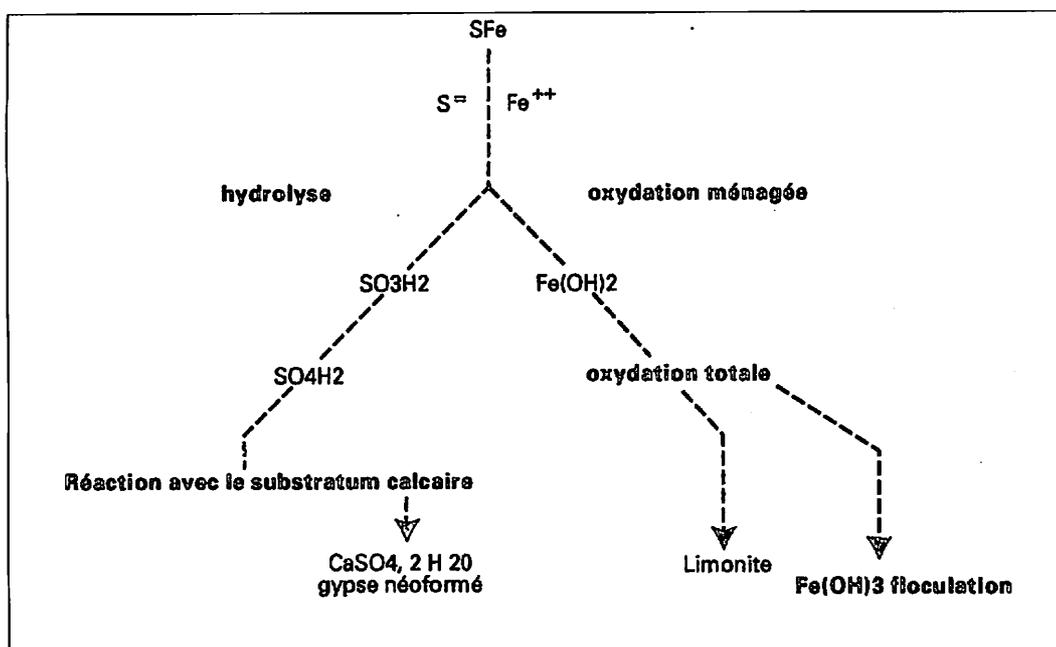


Fig. 22. - Évolution de la Pyrite sous l'effet de l'hydrolyse oxydative.

### Corrosion directe per descensum

Minéraux concernés dans l'ordre de leur solubilité : carbonates de calcium, magnésium et dolomie.

Les infiltrats liquides et solides sont vecteurs du gaz carbonique atmosphérique dont la concentration est de 0,2°/°°. Ils entretiennent la corrosion bicarbonique le long des parois des fissures, les élargissent favorisant progressivement l'infiltration. En même temps, ils apportent une charge très modeste en hydrogénocarbonate de calcium.

La réaction s'écrit :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons (\text{HCO}_3)_2\text{Ca}$ .

L'apport minéral dans l'eau est de 162 mg pour 2 200 m<sup>3</sup> d'infiltrat. Notoirement insuffisant pour justifier la charge bicarbonique de toutes les sources exploitées du Muschelkalk.

Il faut donc rechercher un processus complémentaire.

### Corrosion indirecte per ascensum

Minéraux concernés dans l'ordre de leur solubilité : carbonate de calcium, magnésium, dolomie.

L'agent minéralisateur est le gaz carbonique crustal qui fuse partout le long des axes hercyniens. Il est permis de le mesurer aux griffons de toutes les sources,

classées minérales ou non, notamment celles qui jaillissent au pourtour des boutonnières d'érosion dans la proximité de la forêt de Darney et des environs : Claudon, Tignecourt, Relanges.

La « carrière aux cristaux » ouverte dans un large filon de quartz, est un émetteur aujourd'hui inactif. Le gaz carbonique participe à la karstification des calcaires : sources du Vair, Dombrot-le-sec, Monthureux-le-sec, Valléroy-le-sec, et à la minéralisation de l'aquifère.

### L'hydrolyse directe

- Substratum concerné : la subdivision supérieure des calcaires sur une coupe de terrain fraîche, montre la succession suivante :

- alternance de couches rocheuses de teinte ocre et d'intercalaires argileux, concolores ;
- mince couche verdâtre (2-5 cm) colorée par des sels de fer réduit ; il s'agit de la région chimiquement active du profil ;
- alternance répétée de calcaire et d'argile grisardoise de teinte très sombre ;
- minéraux concernés : divers sulfures de fer microcristallins, la pyrite étant le plus commun ;

– principe : les infiltrats pluviaux apportent 9,2 mg/l d'oxygène. La neige en véhicule encore plus (112 % de la saturation) (fig. 22).

Exposés au lessivage de l'eau oxydante, les sulfures hydrolysés génèrent du gypse néoformé.

L'oxydation maximum du soufre produit l'ion sulfurique, lequel est inconcevable en milieu carbonaté. L'acide fort déplace la base faible, génère du sulfate de calcium qui se dissout dans l'eau à mesure de sa cristallisation. Le processus de minéralisation est continu.

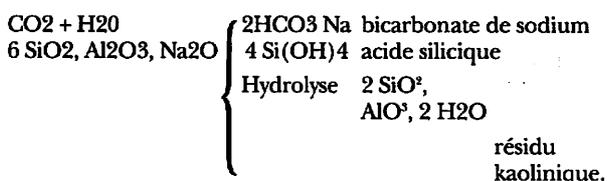
Parallèlement, le fer oxydulé en limonite est adsorbé sur les argiles, de sorte que l'eau minéralisée n'est jamais ferrugineuse.

La roche acquiert une teinte rouille.

*Hydrolyse indirecte*

Le gaz carbonique crustal se dissout dans l'eau qui envoie le réseau fissural. L'acide carbonique active l'hydrolyse des feldspaths :

L'orthose délivre du bicarbonate de potassium, l'albite délivre du bicarbonate de sodium ; en même temps, une quantité appréciable de silice est mobilisée sous forme Si(OH)<sub>4</sub> :



Le gaz carbonique propulse les produits de l'hydrolyse vers la partie supérieure des grandes fractures ouvertes, et se disperse dans la nappe aquifère du Muschelkalk.

En même temps il apporte aussi HCO<sub>3</sub>Na identifié grâce au déséquilibre du rapport Cl/Na dans l'eau minérale (exemples : Contrex, Hepar, tableaux V, VI, VII).

Le fluor provient du socle qui est le seul à détenir la fluorine (F<sub>2</sub>Ca) sous forme filonienne.

Le surplus de gaz carbonique agressif qui pénètre dans la masse calcaire permet d'outrepasser la limite de dissolution de l'hydrogénocarbonate de calcium.

Il suffit de construire la courbe d'équilibre calco-carbonique pour s'en convaincre. Si le point figuratif (symbole « M ») se trouve sur la droite d'équilibre, il ne se passe rien. Si le point est au dessous de la courbe dans le domaine des eaux incrustantes, l'échantillon sous analyse dépose du carbonate de calcium après tranquillisation.

L'intervention du gaz carbonique crustal seule, permet une surdissolution de CaCO<sub>3</sub> dans une eau minérale. Son rôle est affirmé par le cortège des ions issus du socle.

TABLEAU V. – Composition caractéristique moyenne [50] (Contrexéville - Source Pavillon).

Paramètres	Éléments	Valeurs	Unités
Conductivité à 25°C		2 300 us	m E/l
pH		7,15	
Résidu sec à 180°C		2 125,00	
<i>Éléments majeurs</i>			
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	486,00	24,3
Magnésium	Mg <sup>2+</sup>	84	6,91
Sodium	Na <sup>+</sup>	9,1	0,39
Potassium	K <sup>+</sup>	3,2	0,08
Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1 187	24,72
Hydrogénocarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	403	6,61
Chlorure	Cl <sup>-</sup>	8,6	0,24
Silice	Si (OH) <sub>4</sub>	11,26	
Nitrate	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,7	0,04
<i>Éléments traces</i>			
Fluor	F	0,32	0,02
Strontium	Sr	8,7	
Baryum	Ba	19	
Bore	B	203	
Brome	Br	23	
Lithium	Li	55	
Molybdène	Mo	4	

Les autres éléments contrôlés (ug/l) sont inférieurs aux limites de détection analytique :

NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Al, Sb, Ag, As, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Cn, Sn, I, Hg, Ni, Pb, Se, S<sub>2</sub>, Va, Zn.

Gaz carbonique libre observé à certaines sources : +/-19 mg/l.

TABLEAU VI. – Composition caractéristique moyenne [50] (Vittel - Grande Source)

Paramètres	Éléments	Valeurs	Unités
Conductivité à 25°C		1 140	m E/l
pH		7,2	
Résidu sec à 180°C		841	
<i>Éléments majeurs</i>			
Calcium		202	10,10
Magnésium		36	2,96
Sodium		3,8	0,16
Potassium		2,0	0,05
Sulfate		306	6,37
Hydrogénocarbonate		402	6,59
Chlorure		7,2	0,20
Silice		9,91	
Nitrate		4,7	0,07
<i>Éléments traces</i>			ug/l
Baryum		40	
Bore		75	
Brome		20	
Fluor		280	0,016
Lithium		40	
Molybdène		4	
Zinc		5	
Strontium		1,10	

Inférieurs aux limites de détection analytique :

NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Al, Sb, Ag, As, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Cn, Sn, I, Hg, Ni, Pb, Se, S<sub>2</sub>, Va.

TABLEAU VII. - Composition caractéristique moyenne [50] (Vittel - Source Hépar)

Paramètres	Éléments	Valeurs	Unités
Conductivité à 25°C		2 657	m E/l
pH		7,0	
Résidu sec à 180°C		2 580	
Éléments majeurs			
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	555	27,75
Magnésium	Mg <sup>2+</sup>	110	9,05
Sodium	Na <sup>+</sup>	14	0,61
Potassium	K <sup>+</sup>	4	0,10
Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1 479	30,81
Hydrogénocarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	403	6,60
Chlorure	Cl <sup>-</sup>	11	0,31
Silice	SiO <sub>2</sub>	10,88	
Nitrate	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,9	0,05
Éléments traces			ug/l
Baryum	Ba	10	
Bore	B	240	
Brome	Br	30	
Fluor	F	400	0,02
Lithium	Li	70	
Molybdène	Mo	5	
Strontium	Sr	12	

Les autres éléments contrôlés (en µg/l) sont inférieurs aux limites de détection analytique :

NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Al, Sb, Ag, As, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Cn, Sn, I, Hg, Ni, Pb, Se, S<sub>2</sub>, Va, Zn.

### Bulgneville

Le forage artésien foncé vers 1840 [32] dans cette localité avait fait l'objet comme c'était l'habitude en cette époque, d'un dosage systématique des gaz.

Nous reproduisons une analyse ancienne effectuée par Braconnot, citée par [19] Durand-Fardel (1850):

	ml/l	mg/l
Acide carbonique	480	
Carbonate de chaux		131
Carbonate de magnésie		155
Carbonate de strontiane		7,25
Sulfate de chaux		12,7
Sulfate de magnésie		11,2
Sulfate de soude		75,7
Sulfate de potasse		traces
Chlorure de sodium		6,5
Acide silicique		15,00
Alumine		11,7

Les présences de gaz carbonique libre d'une part, de silice sous forme acide silicique d'autre part, sont deux signatures du socle granitique confirmées par le Strontium.

Par la suite, la simplification abusive des analyses réglementaires a fait oublier ces 3 caractères fonda-

mentaux et imposé l'image « sulfatée-calcique » qui déforme totalement le faciès hydrogéochimique de l'eau sous analyse.

Ce forage de Bulgneville accrédite notre interprétation de la charge bicarbonatée calcique et magnésienne des eaux du Muschelkalk.

### Martigny-les-Bains

Cette localité est la plus méridionale des trois stations qui tirent leur ressource hydrominérale du Muschelkalk. Minéralisation totale : 2,34 g/l.

En dépit des avantages dont elle disposait, elle ne s'est jamais remise des dommages causés par le dernier conflit mondial.

Une direction domiciliée en Suisse, une municipalité peu pugnace, une absence de stratégie sont les motifs qui ont conduit rapidement à une mise à l'écart.

Pourtant, nous avons observé dès les années 50, que dans les ruines de la buvette historique, l'écoulement du puits producteur livré au plus total abandon alimentait un tapis d'algues tout à fait remarquable. Il s'agissait d'un complexe au sein duquel les cyanophytes dominaient très majoritairement, caractéristiques des eaux sulfatées [17, 21, 37].

Mises à part les contaminations pédologiques qui favorisaient la croissance de quelques chlorophytes et une foule de diatomées, ces cyanophytes thiophiles ont été étudiées dans le cadre d'un doctorat d'exercice de Pharmacie par N'Guyen Ngoc Tuyet (1983).

Par précaution, nous avons pris le conseil du laboratoire spécialisé de l'Institut Pasteur à Paris.

Bilan : cinq espèces de cyanophytes ont été obtenues en culture axénique. Parmi elles, deux espèces nouvelles non décrites ; une autre, décrite une seule fois sur les rives du lac Tchad, deux *Phormidium* dans leur forme de jours longs.

Il est utile de rappeler que dans une population de cyanophytes, les espèces dominantes et dominées se succèdent au long d'un cycle climatique selon la durée du jour et l'intensité de l'insolation, directe ou indirecte.

Martigny-les-Bains aurait pu tirer argument de cette richesse.

### La Laxière

#### *Situation dans la structure du plateau lorrain*

La Laxière, source commercialisée sous la marque déposée « La Limpide » jaillit à Laneuville-aux-Bois, (54) entre Lunéville et Blamont (fig. 23).

Le site de la Laxière s'aligne selon l'axe d'une cuvette synclinale encadrée par les anticlinaux de Lunéville et de Saint-Clément (fig. 24).

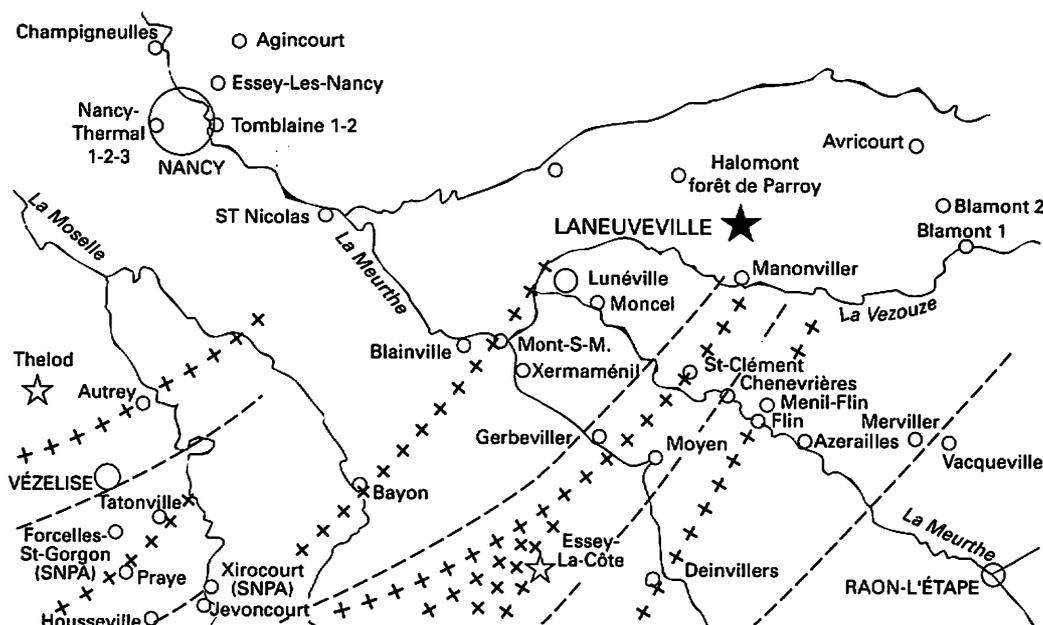


Fig. 23. – Situation structurale de la source La Laxière [30].

*Toponymie*

Toutes les sources de cette région sont minéralisées. De plus, la toponymie héritée des traditions rurales : salière, saline, patras, laxière, indique que la salinité excessive est le support d'une activité thérapeutique purgative.

Aussi les sources du Rhétien, peu minéralisées, sont elles dénommées : Bonnes fontaines.

*Le gisement*

Aucune coupe de terrain, aucune archive ne subsiste après les combats de la libération. La tradition attribue 28 m à la profondeur du puits creusé au début du siècle.

*Origine de l'eau*

Le forage intercommunal de Manonviller, distant de 3 km seulement est une base de comparaison utile :

- 0 52 m : Marnes bariolées du Keuper inférieur
- 52 53 : Dolomie-limite
- 53 66 : Marnes violettes
- 66 69 : Complexe dolomique inférieur
- 69 70 : Toit du Muschelkalk, couches à Ceratites
- À 69 m, éruption sous un débit artésien de 20 m<sup>3</sup>/h.

*Production*

Le débit spontané de la Laxière est de 5 m<sup>3</sup>/h. La température d'émergence s'équilibre à 10,5°C ce qui indique un gisement vers 80 m, estimation conforme aux données du forage de Manonviller.

Toutefois, l'eau force un barrage de 52 m de marnes compactes, imperméables par essence. Il faut donc, pour expliquer l'existence de la Laxière, invoquer au moins une fracture en extension. L'eau s'insinue dans la zone de moindre résistance et parvient au jour. Le puits de 28 m intercepte cette eau. L'analyse chimique apporte des arguments en faveur de cette interprétation.

*L'exploitation de la Laxière*

L'autorisation découle des analyses et du rapport présenté à l'Académie de Médecine le 12 février 1910.

Température extérieure : 4°,1 ; température au grifon : 10°,4.

Analyse quantitative	Symbole	mg/l
Acide sulfurique	SO3	1,3100
Chlore	Cl	0,0541
Silice	SiO2	0,007
Acide azotique	N2O5	0,00134
Acide carbonique libre et semi-combiné		0,169
Potasse	K2O	0,00817
Soude	Na2O	0,3959
Lithine	Li2O	0,000023
Chaux	CaO	0,8457
Magnésie	MgO	0,1829
Oxydes de fer	Fe2O2	0,000357

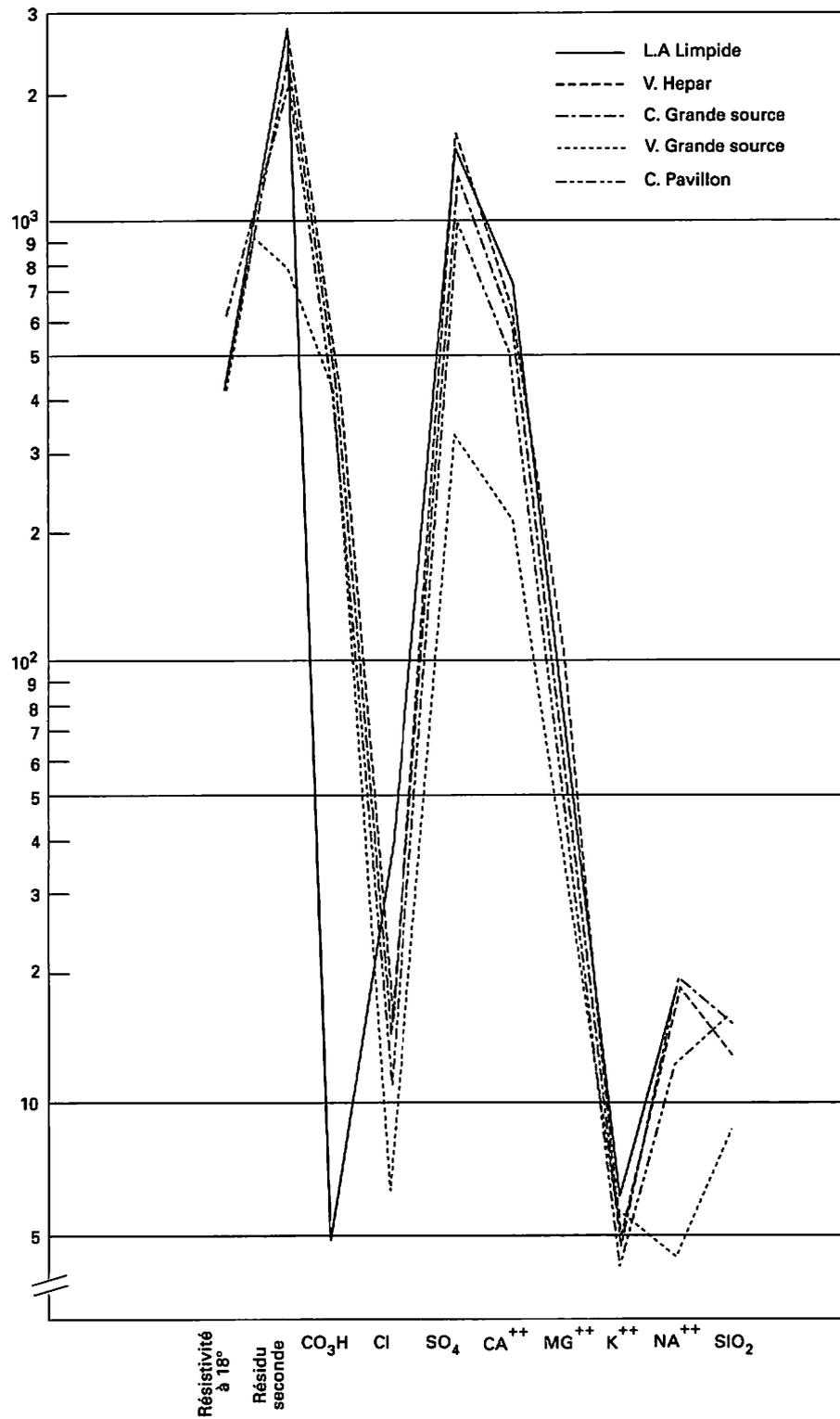


Fig. 24. - Comparaison des sources du Muschelkalk, Vittel Grande Source et source Hépar, Contrexéville source Pavillon, la Laxière (d'après Kadouch, 1976).

Groupement hypothétique selon le rapporteur de l'Académie de Médecine :

Bicarbonate de	{	- calcium	: 0,3728 g
		- magnésium	: 0,0782
		- lithium	: 0,0001
		- fer	: 0,0007
Sulfate de	{	- calcium	: 1,7000
		- calcium	: 1,7000
		- magnésium	: 0,4626
Chlorure de	{	- sodium	: 0,0747
		- potassium	: 0,0129
		- magnésium	: 0,0036
Azote de (sic) :	calcium	: 0,0020	
Silice :		0,0070	
Acide carbonique libre :		0,03	
Minéralisation totale :		2,5751 g	

### Hydrogéochimie

Les analyses effectuées dans nos laboratoires en 1975-76 confirment celles de 1910. Notre interprétation en diffère :

- Le pH mesuré sur place évalué à 6,98 dérive à pH = 6,92 par dissipation du gaz carbonique ;
- ce gaz, libre, agressif, émis par le seul socle granitique emprunte une voie fissurale en extension pour dégager ;
- l'eau est réductrice : - 8,25mV. Elle s'oxyde rapidement une fois exposée à l'air et marque déjà - 7,29mV à son arrivée au laboratoire ;
- le sodium n'équilibre pas exactement le chlore ;
- la température indique une très faible géothermalité et un gisement vers 80 m de profondeur, valeur en conformité avec les données recueillies au forage de Manonviller ;
- la minéralisation des ions majeurs se répartit comme suit :

	mE/l	mE/l
Ca <sup>++</sup> : 32,00 : HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		: 9,08
Mg <sup>++</sup> : 8,33 : SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		: 31,23
Na <sup>+</sup> : 0,78 : Cl <sup>-</sup>		: 0,88
K <sup>+</sup> : 0,15.		

La reconstitution minéralogique la plus probable se traduit ainsi :

ClNa	: 0,78
ClK	: 0,10
SO <sub>4</sub> K <sub>2</sub>	: 0,05
SO <sub>4</sub> Ca	: 22,95
SO <sub>4</sub> Mg	: 8,33
(HC03) <sup>2</sup> Ca	: 9,08
non combiné :	0,06 Ca <sup>++</sup> .

La source La Limpide ne mérite pas l'appellation saline. Les traces de sel gemme et de chlorure de potassium sont à imputer à la minéralisation de la Lettenkohle. De même la charge sulfatée est caractéristique de cette subdivision stratigraphique. Le déficit relatif en hydrogénocarbonate de calcium est une conséquence de l'insolubilité de la dolomie.

### Domèvre-sur-Vezouze

Carrère et Bucholtz (1850) évoquaient, sans la localiser avec précision une source minérale émergeant dans la proximité de cette localité [19].

Embouteillée de façon très artisanale à raison de 200 bouteilles/jour (maximum) elle était recherchée pour ses propriétés purgatives. La production a cessé en 1940.

Dans le périmètre Domèvre - Blamont, il existe une pluralité de sources très minéralisées à dominante magnésienne. Nous les avons déjà évoquées.

Leur dénomination : Saline(s) ; Salière(s) etc., dérive d'une utilisation dans le cadre de l'automédication populaire.

### Les forages de Chezeaux (52)

En 1963, le département de la Haute-Marne s'intéresse à une exploration du seuil morvano-vosgien et plus précisément à la retombée nord de cette structure d'importance régionale. L'objectif consistait à préciser la géométrie du biseau stratigraphique des Grès triasiques. Un sondage a donc été décidé à Chezeaux, comportant deux phases :

- traversée du Muschelkalk en destructif ;
- carottage des Grès suivi de tests hydrogéologiques et d'une analyse physico-chimique.

Lorsque la sonde fut parvenue à 20 m de profondeur, une éruption soudaine s'est manifestée : le débit artésien était voisin de 220 m<sup>3</sup>/h. La surprise était totale.

Dans le village tout proche de Champigny-sur-Varennes où plusieurs exploitations agricoles disposaient déjà, d'un forage au Muschelkalk, le niveau piézométrique des ouvrages était subitement rabattu de plusieurs mètres, par transmission de pression hydraulique. Le forage fut cimenté et la situation rétablie rapidement. Un second forage entrepris à quelque distance put atteindre son objectif sans encombre.

La qualité de l'eau produite répondait au faciès chimique classique des eaux minérales du profil Vittel-Contrexéville-Martigny-les-Bains.

### Bilan

Le territoire français compte deux bassins sédimentaires : aquitain et parisien.

Mais il n'existe **aucun** bassin hydrogéologique producteur d'eau minérale [14]. Les bassins de Vichy comme de Vittel sont des entités imaginaires issues d'une mode datant du début de ce siècle.

Un faisceau de plis issu du Morvan balaye le sud de la Lorraine, se pince dans une charnière unique, complexe, soulignée par des pointements éruptifs de basanite à Essey-la-Côte. Des plis de couverture moulés sur cette structure de fond suivent les déformations ultérieures : failles alpines d'orientation S-N, failles transversales W-E.

Le Muschelkalk avec ses trois faciès (calcaire oolitique, calcaire coquillier, dolomies) est un réservoir aquifère de très grande valeur à cause de :

- son **extension régionale** du nord de la Lorraine jusqu'au rebord du seuil de Bourgogne ;

- la **réserve potentielle** qui ressort de la pluviosité de la région, une excellente aptitude à emmagasiner la plus grande partie des infiltrats, effacer les irrégularités saisonnières de leur distribution ;

- la **qualité de la minéralisation** des eaux dont les composants sont porteurs d'indications thérapeutiques.

La minéralisation globale ressort d'un mécanisme complexe faisant appel à 3 processus de mise en circulation des ions en conformité avec les lois des solutions aqueuses, l'équilibre calco-carbonique, principalement.

La charge minérale est équitablement répartie entre les hydrogénéo-carbonates et les sulfates, les cations majeurs étant le calcium, suivi du magnésium.

Les signatures sont sédimentaire et crustale ; la seconde attachée aux émissions gazeuses du socle et au transfert des éléments issus du lessivage des filons : fluor, baryum, strontium. Lithium et bore, sont des inclusions du réseau intracristallin des micas, libérées à l'occasion de la mobilisation de l'acide silicique.

Le caractère fissuré de la formation toute entière expose les nappes à l'infiltration des déchets de nos activités, agricoles principalement.

Aussi, nous croyons rendre simplement justice aux Grands Embouteilleurs en saluant la politique d'acquisition et neutralisation des terres poursuivies depuis plusieurs décennies déjà. En consacrant les espaces protégés à la prairie naturelle, ils ont réalisé le plus démonstratif et le plus sécurisant périmètre de protection que nous connaissons.

## RESERVOIRS JURASSIQUES

### L'aquifère du Toarcien

La source de Dolaincourt (88) jaillit à quelques kilomètres de Neufchâteau dans une vallée largement

échancrée et profondément taillée dans le Lias. Son environnement est couronné de buttes - témoin jurassiques.

Un ruisseau, modeste tributaire du Vair, draine la vallée. Une source sulfurée jaillit dans sa proximité.

Les deux versants ont une vocation de prairies pâturées, aucune coupe de terrain n'est observable.

Cette source a fait l'objet de curiosité plutôt que de recherches proprement dites. Des analyses partielles, exécutées hors du contexte de l'émergence (pH, potentiel rédox, oxygène dissous, gaz carbonique libre) ne portent que sur les partenaires traditionnels : bicarbonates, sulfates, chlorures. Les cations ne sont pas significatifs.

L'emplacement de la source s'inscrit par contre dans le contexte très fracturé des confluent de la Meuse, Saonelle, Vair et Mouzon. Les pertes karstiques de ces rivières ou fleuve sont partielles ou totales. Des failles méridiennes d'âge post-alpin sillonnent les alentours.

La source de Dolaincourt n'est pas géothermale, mais elle est intéressante à cause de sa sulfuration.

Ce caractère a été mis au compte de l'imprégnation bitumineuse des marnes toarciennes à travers lesquelles elle émerge. Si la source était alimentée par une circulation propre au Toarcien, elle ne pourrait être pressurisée. Il faut donc envisager une autre explication, difficile à assurer sur des bases analytiques qui ne sont pas disponibles actuellement.

Nous pensons qu'une corrélation pourrait être établie avec les combustibles fossiles existants dans le proche périmètre : la houille a été exploitée au XIX<sup>e</sup> siècle et pendant la période 1942-44 à Saint-Menge et Gellenoncourt, dans un gisement local situé dans les « Grès à roseaux » (Schilfsandstein) du Keuper moyen.

Dans le secteur lorrain de l'aire de sédimentation du Trias moyen, lignites et charbon sont rares. Par contre en Souabe, ils ont été exploités à l'échelle industrielle pendant longtemps.

La source de Dolaincourt termine son parcours souterrain à travers le Toarcien, mais rien ne prouve que cet étage retienne une nappe aquifère sulfurée qui lui soit propre.

Des mesures *in situ*, une bonne cartographie locale étendue, une analyse structurale, sont les conditions de l'approche cohérente d'une explication sur le caractère sulfuré de cette source.

### L'aquifère portlandien

Source Sainte-Odile à Longeville-en-Barrois (55).

La source émerge au fond d'un vallon adjacent à la rive gauche de l'Ornain dans un contexte structural important : retombée de l'axe Bar-le-Duc - Saint-Mihiel-Boulay-Sarreguemines dont le top est distant d'un kilomètre.

Le long de cet axe majeur, les calcaires portlandiens sont très morcelés pour trois raisons :

- surélévation précoce de l'axe ouvrant une fracturation en éventail ;
- installation d'un karst exploité en minières sur le plateau ;
- fissuration climatique péri-glaciaire.

Fissuration et fracturation s'interpénètrent ; aussi, les infiltrations pluviales et nivales résident peu de temps dans le réservoir aquifère. Elles sont collectées au toit des marnes kimmeridgiennes en une nappe qui, à Longeville, émerge à contre-pendage.

La protection bactériologique d'une source dans un tel contexte est quasi-impossible.

Des analyses exécutées dans le désordre, retenons que l'eau est dure, calcique, que des ions mineurs accompagnent la charge de base, conforme à la constitution de la roche-magasin.

L'hydrogéochimie ne fait pas apparaître le caractère qui serait le vecteur d'une activité pharmacodynamique digne d'intérêt.

Il semble que le projet thermal élaboré en 1994-95 ait dérivé vers un embouteillage, pour finir en activités sportives.

À de telles péripéties coïncidant avec une fièvre pré-électorale, le Thermalisme perdrait ce qui lui reste de crédibilité.

## RESSOURCES AQUIFÈRES DU CRÉTACE INFÉRIEUR

### Saint-Dizier

La source Marina s'écoule à 2 km de la ville, dans la forêt de Val.

Les analyses pratiquées par M. Legrip et O. Henry sont contradictoires : nous reproduisons l'une d'elles [19].

Gaz acide carbonique :	126 mg/l
Gaz hydrogène sulfuré :	21
Carbonate de chaux :	20,1
Carbonate de magnésium :	28,2
Sulfate de soude :	30
Sulfate de chaux :	29,7
Sulfate de magnésium :	48
Sulfate de potasse :	32
Chlorure de magnésium :	32
Phosphate d'alumine :	20
Fer (en sesquioxyde) :	110
Manganèse + Silice + Brome + Iode + Cuivre	
Traces.	

Classée bicarbonique-ferrugineuse à la suite de cette démarche qui écarte d'office le caractère sulfuré comme étant une erreur, il est bien clair que l'avenir de cette source ne pouvait guère être radieux en se basant sur une aussi étrange interprétation.

### Remarque

1) Le sulfate de potasse ne se conçoit que dans un contexte lagunaire hypersalin.

2) Les solubilités respectives des carbonate de calcium et de magnésium sont si faibles que les chiffres rapportés sont peu crédibles.

3) Le fer quant à lui semble être en relation avec la colonisation du griffon par des sidéro-bactéries mucilageuses.

4) Les postes « acide carbonique et carbonates » sont incompatibles. Si la présence de gaz était confirmée, les carbonates disparaîtraient.

5) Les termes de l'analyse sont en contradiction totale avec les conditions d'existence en solution aqueuse des minéraux annoncés. Le phosphate d'aluminium est imaginaire.

### Sermaize-les-Bains

La source minérale de Sermaize-les-Bains est citée pour la première fois en 1696 par Edme Baugier [4].

Cette localité revient périodiquement sous les feux d'une actualité soutenant des projets grandioses qui n'ont jamais dépassé le stade d'une velléité. Ainsi, l'établissement est-il transformé en discothèque.

• *L'ouvrage producteur* : il s'agit d'un puits d'un diamètre approximatif de 2 mètres, maçonné. Creusé à l'emplacement d'une venue d'eau spontanée en un lieu humide, ce qui laisse présager que cette source se trouvait sous-pression.

• *Débit* : la littérature cite des débits fort modestes :

Année	hl/j	l/h	°C
1852	345,00	soit 1 437,50	12
1860	33,696	soit 1 404,00	11

• *Niveau d'équilibre hydrostatique* : ce repère est inconnu de sorte que les valeurs du débit sont à recevoir avec prudence. Le calcul du débit spécifique est impossible.

• *Démarches analytiques* : Toutes sont incomplètes et critiquables parce qu'elles ne sont pas étayées par l'étalement *in situ* des paramètres suivants : température extérieure et température de l'eau en écoulement libre prolongé, pH, potentiel d'oxydo-réduction, oxygène dissous, gaz carbonique libre, radon.

- Vérification par O. Henry (1852) des analyses de Chevillon et de Calloud en 1846 [12] :

Résidu sec :	1,533 g/l
Sulfate de chaux, magnésie et soude, ensembles :	0,800
Bicarbonate de Ca, Sr, Mg, Na, ensembles :	0,630
Chlorures de calcium et magnésium :	0,040
Silicates d'aluminium et calcium :	0,050
Crénate d'oxydes de fer :	0,015
– R. Jacquot 1881 [26]. L'auteur renvoie à l'analyse de O. Henry en précisant :	
sulfate de magnésie :	0,68 g/l
carbonate de magnésie :	0,04.
– Analyse sans nom d'auteur, ni date, citée par P. Benoit, 1872, retenue pour référence par l'Académie de Médecine :	

	mE/l		mE/l
Ca <sup>++</sup>	9,400	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,250
Mg <sup>++</sup>	13,868	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	14,542
Na <sup>+</sup>	0,422	Cl <sup>-</sup>	0,231
K <sup>+</sup>	0,271	F <sup>-</sup>	0,047
Fe <sup>++</sup>	0,073		
	Σ <sup>+</sup> = 24,034		Σ <sup>-</sup> = 24,070 Δ = - 0,037

– Notre interprétation repose sur les principes suivants : Le Fluor n'existe que sous forme de fluorine, minéral filonien du socle cristallin. Le Chlore n'équilibre pas le Sodium. Δ = 0,191 mE. Dans ce cas, l'excès de sodium trouve un partenaire : l'ion bicarbonique. Conséquence de ce qui précède : l'hydrogénocarbonate de sodium ne peut exister qu'après hydrolyse des feldspaths du socle granitique soumis à une hydrolyse acide : Orthose et Albite.

Dès lors, il ressort que l'eau de Sermaize-les-Bains n'est pas : bicarbonatée calcique et magnésienne et sulfatée calcique et ferrugineuse et, et, et,

Cette eau ne manque pas d'intérêt ; nous proposons de reconstituer sa minéralogie.

• Répartition verticale des héritages géochimiques :

– Sédiments lagunaires de l'Albien basal :

	m E/l
NaCl	: 0,231
CaSO <sub>4</sub>	: 0,241
MgSO <sub>4</sub>	: 13,868
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: 0,030

– Calcaires du Barrois (Portlandien) :

(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Ca : 9,159

– Socle granitique :

F <sub>2</sub> Ca	: 0,047
HCO <sub>3</sub> Na	: 0,191
HCO <sub>3</sub> K	: 0,271

Remarque : l'hydrogénocarbonate de calcium étant en sursaturation, ne peut se maintenir en solution stable que si celle-ci est, de son côté, surchargée en gaz carbonique dissous, agressif, excédentaire.

• Conclusion sur l'origine de l'eau de Sermaize-les-Bains :

Cette eau n'est pas *une*, mais *polygénique*, résultat de la cumulation de plusieurs héritages géochimiques qui procèdent :

- Albien inférieur : chlorures et sulfates.
- Jurassique terminal : hydrogénocarbonate de calcium.
- Socle granitique : fluor, lithium, acide silicique, gaz carbonique, hydrogénocarbonate de sodium.

Notre explication est d'autant plus plausible que la source, en son état naturel, se trouve à moins d'un kilomètre du tracé d'un axe majeur pour la structure profonde du Bassin de Paris : retombée septentrionale de l'anticlinal Saint-Dizier-Robert-Espagne.

L'émergence coïncide avec le cortège de fractures qui accompagne l'accident principal.

## LE CRETACE SUPERIEUR

### La Roche-Posay

La Roche-Posay se trouve dans l'axe du couloir qui permettait aux bassins sédimentaires parisien et aquitain de communiquer entre eux. La situation géologique est donc stratégique.

Un regard porté sur le passé de cette station nous laisse perplexe : les eaux sont classées « sulfureuses », argument que l'on trouve tant dans des ouvrages de vulgarisation tel que le Grand Larousse en 6 volumes de 1930, que dans le précis d'Hydrologie de Jadin et Astruc [27].

### Le cadre géologique

Le substratum est constitué par la craie dont l'épaisseur est considérable. Cette formation est entaillée par la Creuse qui élève deux rives escarpées.

Les formations superficielles : déblais et remblais urbains étant écartés de notre réflexion, les formations superficielles qui forment des lambeaux de grande étendue connus sous le nom de formations de Brenne jouent un rôle important : en effet, formés de sables, argiles, graviers interstratifiés ces dépôts sont les reliques d'un alluvionnement très ancien ayant raviné le Massif central. Un enrichissement indirect en minéraux de la famille nucléaire a été constaté ainsi que des éléments-trace précieux, tel le Sélénium.

Le lessivage entraîne dans la craie des infiltrats enrichis, la craie n'est pas un gisement mais seulement un lieu de transit.

TABLEAU VIII. – Caractéristiques des ouvrages producteurs de La Roche-Posay.

Désignation	Puits prof. m	Forage mm	Localisation profitable	Puits prof. en m	Galerie latérale ml	Formation de Brenne épaisseur m	Arrivées d'eau
Source du bas : Saint-Savin Saint-Cyprien, Duguesclin			ancien Établissement				
Saint-Roch Pictaves	1,20		Hôtel Saint-Roch	15 15,50		1,00 2,50	14
Connétable 1946 Mélusine	2 2,40		périmètre urbain	53 34	35 5	7 5	6 à 26
Sainte-Radegonde				57,60		19,40	23 26 29

### Le patrimoine hydrominéral

Les sources historiques de La Roche-Posay se répartissent en 3 groupes :

- la source du bas est une émergence à griffons multiples ; elle jaillit à 1 200 m du centre ville en direction du SW,
- Saint-Roch, Pictaves, à 900 m de la précédente,
- les sources Connétable, Mélusine, Sainte-Radegonde, constituent le 3<sup>e</sup> groupe [22].

### Caractéristiques des ouvrages

Il s'agit de puits creusés à la main en grand diamètre, souvent quadrangulaires. Une galerie latérale a été parfois adjointe.

La fissuration de la craie se ferme puis devient capillaire. Il n'est pas utile de ce fait de prolonger un ouvrage en espérant augmenter le débit proportionnellement au surcroît de profondeur (tableau VIII).

### Hydrogéochimie

La composition de base des eaux de La Roche-Posay reflète celle de la nappe aquifère de la craie : – hydrogénocarbonatée calcique et accessoirement sulfatée calcique parce que le ciment lessivé en surface, est intact en profondeur. L'eau captée est donc normalement de plus en plus sulfatée en approfondissant un ouvrage.

À la géochimie de la craie viennent s'ajouter les éléments mineurs et les traces délivrées par les formations de Brenne qui donnent aux eaux de La Roche-Posay toute leur spécificité.

Celles-ci sont recoupées et soutirées directement par plusieurs ouvrages : Saint-Roch, Pictaves, Connétable, Mélusine, Sainte-Radegonde.

Elles peuvent aussi percoler dans la craie à l'échelle du plateau et enrichir la nappe de la craie.

### Sources ferrugineuses de Basse-Normandie

Il s'agit de modestes écoulements à propos desquels, seul, le dépôt d'hydroxydes de fer autour des griffons a été retenu. Ce caractère a conduit à une impardonnable erreur de raisonnement : le classement dans la catégorie des eaux ferrugineuses.

Une eau minérale n'est **jamais** ferrugineuse. Elle transporte du fer élémentaire sous sa forme ionisée réduite (Fe<sup>2+</sup>), instable. Celle-ci passe sous la forme oxydée (Fe<sup>3+</sup>), stable dès son exposition à l'oxygène atmosphérique.

### Gisement

Il n'est pas permis de regrouper les sources observées à Boulon (14), Brucourt (14), Gournay (76), Rançon (14), Valmont (76) et Saint-Wandrille (76) comme l'ont fait certains auteurs parmi lesquels, Jadin et Astruc [27].

Les formations géologiques sont aussi différentes que : socle schisteux métamorphique, marnes de l'Oxfordien, craies du Cénomaniens au Danien.

### Composition chimique

L'analyse de Brucourt est l'exemple type d'un bilan non crédible :

Peroxyde de fer :	60. mg/l	résidu sec	2 121. mg
Carbonate de calcium :	950 mg/l	non dosé	1 031
Carbonate de magnésium :	240 mg/l	perte à l'analyse	49 %
Sulfate de calcium :	640 mg/l		
Total :	1 890 mg/l		

#### • Remarques :

– l'expression sous forme de peroxyde de fer (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) est en contradiction avec la forme hydrosoluble de ce métal ;

– le concept « carbonate » n'est admissible que si  $8,3 < \text{pH} < 9,2$  ce qui est bien peu probable ;

– dans les environs de Cabourg, le fer provient de l'hydrolyse de la pyrite qui enrichit les célèbres « vaches noires ». Les produits dérivés sont l'hydroxyde ferrique et le sulfate de calcium néo-formé qui repasse aussitôt en dissolution dans les eaux circulantes ;

– dans le cas de la craie verte au contraire, la coloration de la roche est due à un silicate de fer : la glauconie. Ce minéral très fragile s'hydrolyse facilement en délivrant de l'hydroxyde ferrique et de la silice sous forme d'acide silicique.

*Bilan* : la modicité des débits, une désaffection à l'endroit des sources ferrugineuses, sont les causes de la sous-estimation du patrimoine régional de Basse-Normandie.

Les oxydes de fer sont d'excellents capteurs d'oligo-éléments.

L'acide silicique est un agent cicatrisant apprécié dans le traitement des brûlures. Deux arguments pour qu'une étude approfondie soit entreprise, avec les moyens que nous offre la technologie d'aujourd'hui.

### L'Épinay

Cette localité de Seine-Maritime qui se trouve à 3 km de Fécamp ne doit pas être confondue avec Épinay-sur-Seine où, dans le passé, des sources sulfurées étaient répertoriées.

Le contexte stratigraphique est celui de la craie blanche.

Une analyse très ancienne (Germain, 1840) qui mérite bien sûr d'être actualisée, expose le bilan suivant :

Carbonate de fer :	64 mg/l
Carbonate de chaux :	136
Carbonate de magnésie :	42
Chlorure de potassium :	21
Chlorure de calcium :	42
Acide silicique :	42
Sulfates :	absents.

#### • *Remarques* :

1) La composition annoncée, même si elle est fragmentaire, est tout à fait étrangère à celle de la nappe de la craie. Il est permis de penser que la composition est polygénique, ce que les remarques qui suivent vont s'efforcer de montrer.

2) Le chlorure de calcium ne se conçoit que dans le cadre d'un bassin sédimentaire complètement clos, tel la mer Morte. Inexistant dans les nappes aquifères classiques, il ne se rencontre que dans un milieu en cours de dolomitisation active : le chlorure de calcium est alors la scorie de la réaction.

3) Les valeurs des minéraux dosés (en lieu et place des ions) sont un multiple de 21 : 21,42, 64, ce qui est étonnant.

4) L'insolubilité naturelle des carbonates implique un septicisme affirmé envers les valeurs indiquées.

5) L'acide silicique, au taux de 42 mg/l signerait une circulation dans une roche cristalline soumise à l'hydrolyse. Dans ce cas, le moteur de l'hydrolyse serait le gaz carbonique crustal. Le fer pourrait provenir de l'hydrolyse des micas (biotite) et des autres minéraux ferro-magnésiens.

#### • *Perspectives d'avenir* :

Il est hors de question d'exploiter une source aussi modeste. Par contre, une étude plus approfondie permettrait de confirmer ou infirmer une relation avec un accident profond permettant la diffusion du gaz carbonique crustal, l'hydrolyse des feldspaths et des micas et la mise en circulation d'une quantité d'acide silicique qui, si elle n'était pas confirmée par la concordance de plusieurs critères, serait une erreur technique.

Nous recommandons de reprendre l'analyse de cette source dont la dépendance avec la structure profonde du bassin de Paris reste à établir.

### Fontaine-Bonneleau (Fontaine-sur-Cateau)

Au Nord de Crevecœur-le-Grand, de modestes ruisseaux évacuent le trop-plein de la nappe phréatique de la craie : Sources Lapostelle, Vallot et Lavenot : débit cumulé estimé 40-45m<sup>3</sup>/j.

Dans ce contexte, 3 sources ferrugineuses ont été classées « minérales » dans le passé.

Les analyses de O. Henry (1858) sont déconcertantes. Exprimées dans le langage de son époque, fragiles en raison de nombreuses contradictions au plan géochimique.

Toutefois, il ne faut pas minimiser l'importance des crénates de fer et de manganèse.

En l'absence de précision apportée par une analyse plus conforme, il faut penser à une eau carbo-gazeuse qui véhicule des métaux à l'état réduit. Ceux-ci flocculent sous forme hydroxylée et favorisent le développement des sidéro-bactériales [11].

Il faut d'abord s'intéresser au pH, potentiel redox et à un éventuel dégagement de gaz carbonique d'origine profonde.

### La Chapelle-Godefroy

Deux sources jaillissent dans cette localité, sur la rive gauche de la Seine, non loin de Nogent-sur-Seine.

D'une analyse rapportée par Ch. J.E. Cadet de Gasricourt et Eusèbe Salverte, retenons :

	ml/l	g/l
- Gaz carbonique libre	1 556	
- Carbonate de calcium		3,630
- Carbonate de fer		3,030
- Minéralisation totale		6,660

Une investigation plus attentive s'impose à la lecture de ces chiffres qui apportent les moyens d'une interprétation intéressante de la minéralisation qui est d'origine profonde.

Le gaz carbonique, surabondant, est délivré par le socle granitique vers 1 000 m de profondeur. Ce gaz est le moteur ascensionnel des eaux. Les carbonates énoncés par les auteurs atteignent une importance exceptionnelle grâce à la sursaturation de l'eau en CO<sup>2</sup>.

La dissipation du gaz à l'émergence devrait favoriser l'édification d'un travertin dont il n'est pas fait mention.

Il est clair que cette source à deux griffons se trouve sur le trajet d'une faille majeure du Bassin de Paris appartenant au groupe de cassures d'âge alpin qui découpent le Morvan et traversent la forêt d'Othe selon une direction sud-méridienne.

## L'AQUIFÈRE ÉOCÈNE

### Généralités

#### Le réservoir

Les sables et graviers landéniens regroupés dans les étages Thanétien et Sparnacien constituent un bon réservoir aquifère dont la minéralisation comprend deux phases :

- minérale : sulfurée, bicarbonatée, sulfatée et chlorurée en proportions conformes à la géochimie de la roche-magasin,
- organique : thiols.

#### Structure

Selon la région du bassin de Paris qui est concernée, le réservoir est :

- **découvert** l'érosion ayant décapé la couverture sédimentaire,
- **recouvert** par les argiles plastiques et le Lutétien.

À l'est de Fismes et juqu'à Cambrai, la nappe aquifère est en milieu oxydant. Les sources sont parfois ferrugineuses après oxydation des matières organiques auxquelles le fer est chélaté.

À l'ouest de Fismes jusqu'au sud de Versailles, les sources sulfurées sont nombreuses. Enghien-les-Bains, localité-phare n'est pas en situation de prétendre à l'exclusivité.

En réalité, elle n'est qu'un maillon dans un alignement de 135 km de long jalonné d'est en ouest par : Fismes-le-Gros-Bois, Pierrefonds, Aumale, Dammartin-en-Goële, Saint-Mard, Thieux SNCF, Charles-de-Gaulle aéroport, Livry (Sévigné), Compans, Aubervilliers (5 sources), Austerlitz (quai d'), Épinay (2 sources), Enghien-les-Bains, Saint-Gratien, Pont-de-Marly, Bouafle, Cernay, Forges-les-Bains.

### Origine du soufre réduit

Nous expliquerons dans la troisième partie de ce travail pourquoi le soufre réduit ne peut pas provenir de la rétrogradation des sulfates.

Le soufre réduit hydrosoluble est présent dans l'eau sous deux formes : minérale HS<sup>-</sup> ; organique S-R.

Ce soufre dérive de la fossilisation des déchets de la vie continentale, marine, et saumâtre. À la filière *protéique* se rattachent : cadavres animaux, plancton pélagique et benthique.

Les thioamino-acides cellulaires attaqués par des bactéries biodégradantes libèrent une première vague d'hydrogène sulfuré (*kraking*).

D'autres bactéries procèdent du *reforming* : elles synthétisent des molécules organiques sulfurées : les Thiols (mercaptans des auteurs anciens).

La seconde filière, *cellulosique*, appartient au règne végétal : les produits de la destruction torrentielle du couvert, tant herbacé qu'arbusculaire, sont entraînés dans les lagunes littorales où ils subissent le rouissage et une humification totale après macération. Le soufre cellulaire, est minéralisé (hydrogène sulfuré) ou engagé dans des combinaisons thioliques.

La digestion de la lignine conduit à la cellulose. Celle-ci peut réagir avec l'acide silicique dissout. Une réaction d'épigénie s'amorce, conduisant à la silicification du bois. Ce phénomène est très fréquent en Ile-de-France.

La réduction des sulfates en sulfure de calcium est une survivance de l'obscurantisme qui a profondément marqué le siècle précédent, et que d'aucuns tentent encore d'imposer par tous les moyens.

### Bussiares

Dans cette localité proche de Château-Thierry établie sur les rives du Clignon, affluent de l'Ourcq, une source classée « sulfureuse » au XIX<sup>e</sup> siècle répondrait à la composition reproduite telle [19].

Gaz carbonique libre :	19 ml
Carbonate de calcium :	32 mg
Carbonate de magnésium :	120
Sulfate de sodium :	37
Sulfate de calcium :	68
Chlorure de magnésium :	64
Fer :	traces
Total :	321 mg/l.

Cette analyse, peu recevable, ne tient pas compte des participants dans le calcul entrepris pour procéder à une reconstitution hypothétique.

Les carbonates ne peuvent pas atteindre de telles concentrations. De même, le sulfate de sodium est inconcevable dans le contexte du contact de l'Eocène basal sur le toit de la craie.

Le gaz carbonique libre ne peut apparaître au bilan que s'il provient d'une évaporation grâce à la proximité d'une faille majeure cassant le socle cristallin au-delà de 1 000 m de profondeur.

Dans ce cas, le sulfate de sodium pourrait provenir d'un lessivage au toit de la formation salifère triasique qui atteint son épaisseur maximum dans les environs de Coulommiers.

Il faudrait pouvoir vérifier ces hypothèses, avant d'habiliter, partiellement au mieux, l'analyse qui est proposée.

*Remarque* : sur le tracé de l'autoroute A4, deux suintements émergents de la craie sénonienne alimentent une active végétation de cyanophytes. Le mode de circulation de l'eau, *per descensum*, ou *per ascensum* n'est pas établi.

Il serait utile de pouvoir reprendre l'étude de ces venues aquifères afin d'en élucider l'origine liée à la structure régionale.

### Forges-les-Bains

Dans le département de l'Essonne, Forges-les-Bains \* est un bourg modeste complètement tombé dans l'oubli [42].

Son patrimoine hydrominéral compte deux sources :

– la *première* doit son caractère ferrugineux au lessivage d'un humus forestier très acide élaboré sous le couvert d'un peuplement de châtaigniers qui occupe les sables stampiens. Le fer pédologique passe en phase aqueuse sous forme réduite ( $Fe^{2+}$ ) chélatée aux acides humiques. Dès que les eaux s'écoulent à l'air libre, processus *per descensum*, le fer floccule sous forme d'hydroxydes. Ceux-ci sont fréquemment colonisés par des sidéro-bactéries qui élaborent le « fer des près », minerai exploité du V<sup>e</sup> avant jusqu'au XVIII<sup>e</sup> après J.C. Briis-sous-Forges tire son toponyme de l'existence de forges dites « catalanes » en activité sous la protection du donjon seigneurial voisin.

Le forgeron, artisan maléfique puisque capable d'extraire le métal d'un minerai couleur de sang, exerçait son activité hors de la communauté dont il était statutairement exclu. Ainsi en est-il de Forges-les-Bains tenu à l'écart de Briis, résidence du Seigneur.

– La *seconde* source est intéressante à cause de son caractère sulfuré. La ressource hydrominérale retenue

dans les sables thanétiens vers 50 m de profondeur, remonte vers la surface, processus *per ascensum*, en empruntant le réseau de fractures associé aux déformations qui ont conduit aux captures des cours supérieurs de la Remarde, Renarde, Jouyne et Orge.

Au plan structural, malgré la modicité du débit des sources, Forges-les-Bains est le jalon le plus méridional de l'aquifère éocène en Ile-de-France.

### Enghien-les-Bains

#### Regard porté sur le passé

Le passé d'Enghien-les-Bains est honorable.

La première mention d'une source s'écoulant dans un ruisseau puant revient au Père L. Cotte, en 1776. À cette date, Enghien n'existe pas en tant que ville, ni village, seules quelques habitations construites au pied de la butte, dépendent de Montmorency.

En cette époque, la chimie est cryptogène. Néanmoins, des réactions qualitatives à la base de sirop de violettes [3] ne doivent pas faire sourire : elles indiquent clairement que l'eau est acide, ce qui est incompatible avec un jaillissement à travers une formation calcaire. Il faut donc déterminer quel est le support de cette acidité. La réponse est apportée par les tous premiers analystes.

	acide carbonique libre g/kg
– Le Veillard, 1771 :	réaction acide de la teinture de tournesol
– O. Henry, 1823 :	0,248
– Longchamp, 1826 :	0,290
– Leconte, 1900 :	0,202

L'identification du gaz carbonique libre, agressif, est donc ancienne. Mais nul ne s'en soucie.

#### Méfais de la classification universelle des eaux minérales

Le caractère sulfureux seul a retenu l'attention dans la psychologie d'une époque au cours de laquelle le concept soufre se confondait avec une origine volcanosatanique. Ainsi, la dénomination sulfureuse a-t-elle traversé deux siècles sans encombre avec la complicité de rapporteurs plus soucieux de plaire que d'approfondir l'étude hydrogéologique du site.

Reconstructions, réhabilitation d'immeubles existants, plus récemment création d'un groupe hôtelier et d'un parking souterrain font fi des prescriptions attachées au périmètre de protection.

(\*) Ne pas confondre avec Forges-les-Eaux (76).

Ainsi les sources [23, 45] :

- **des Roses** se trouve sous le plancher du théâtre, au Casino ;
- **Inominée** est enfouie sous l'escalier d'accès à la buvette en surplomb sur le rivage ;
- **Pècherie** a été détruite ;
- **Péligot** est surmontée d'un groupe statuaire. Accès impossible.

Chaque emplacement, jadis pollué, est désormais un point potentiel d'infiltration contaminante.

### Le patrimoine hydrominéral

La découverte du Père L. Cotte, la réputation des eaux « sulfureuses » dans les Pyrénées, sont les causes qui expliquent une soudaine activité déployée à Enghien pendant le XIX<sup>e</sup> siècle, à la recherche de nouvelles ressources.

En fait, il existait des suintements qui se dispersaient dans le sol tout autour du lac. Des puits furent creusés ça et là, très peu profonds.

La concurrence devint si féroce que l'administration dû mettre une fin à cette guerre des puits qui ne sévissait pas seulement à Enghien, mais dans toute la France.

C'est pourquoi, afin de protéger les sources déjà accréditées, le Service des Mines fit délimiter un périmètre de protection. Ce document enveloppe la totalité du périmètre urbain. Son objectif était d'interdire le creusement de tout nouvel ouvrage qui aurait pu diminuer ou suspendre la production des puits déjà exploités. La protection était volontairement orientée vers l'extraction des richesses du sous-sol.

Enghien-les-Bains a compté jusqu'à 24 « sources » dans son patrimoine, réparties entre plusieurs propriétaires-exploitants.

Ces ouvrages étaient de conception tout à fait conforme à l'usage du temps (fig. 25 à 33) : cuvelages, puits, parfois prolongés par un forage (tableau VI).

Leur emplacement était conditionné par la propriété déjà établie du terrain et l'intention inavouée de dévier une circulation souterraine au détriment d'un voisin. Ainsi, une guirlande de « sources » ceinture le lac, deux ont été creusées en pleine eau.

Investies par un urbanisme de plus en plus dense, exposées aux contaminations microbiennes issues des fosses fixes et septiques ou encore du réseau d'assainissement qui s'étend peu à peu, les sources atteintes par une pollution microbienne sont interdites à l'usage médical les unes après les autres.

La recherche des causes ne sera jamais entreprise. Le point d'eau incriminé ne sera jamais neutralisé par une cimentation sous pression. Les lieux restent en l'état d'abandon.

En 1997, les Thermes exploitent 1 seule source autorisée : Coquil 3.

TABLEAU IX. – Caractéristiques des ouvrages.

Désignation de la source	Profondeur en m	Prolongé sur	Épaisseur de la tranche d'eau exploitable
Deyeux	1	0	0,60 m
Roy	1		0,60
Peligot (1969)	7,28		1,73
Peligot (1977)	11,42	4,14	5,87
Lac n° 1	5,45		5,59
Lac n° 2	4,40		4,50
Nord	7,18		2,60
Coquil	6,55		1,70

La tranche d'eau exploitable ne dépasse pas quelques mètres, dans la meilleure hypothèse (tableau IX).

En creusant un captage, l'idée directrice, était de ne pas perdre le filet d'eau recherché. Cette crainte antique et irraisonnée est encore présente aujourd'hui dans tous les esprits.

### Piézométrie

Rappel : cette méthode consiste à aligner les niveaux d'équilibre de tous les ouvrages (puits, forages) au repos, par référence au nivellement général de la France. Jusqu'ici, cette notion n'avait jamais été abordée à Enghien-les-Bains.

Les cotes s'ordonnent selon des courbes de niveau ou équipotentielles classées en ordre décroissant conforme à la direction d'écoulement de l'aquifère.

La figure 39 présente la synthèse de ces observations :

- la pente qui affecte l'écoulement le long des courbes 40-39-38 est cassée au niveau de l'espace 38-37 qui dessine un replat ;

- à la Pècherie, la géométrie des courbes 37-36-35 était influencée par le drainage-soutirage exercé par le déversoir de l'émissaire du lac ;

- la courbe intermédiaire 37,5 en très faible surélévation, marque sans doute l'emplacement d'une arrivée d'eau sous pression.

### Production

Les réactions du niveau statique n'ont pas fait l'objet de mesure au cours des tests de pompage, de sorte que nous ne disposons pas de graphe : **descente - stabilisation - retour à l'équilibre initial**.

Pas de courbe caractéristique de chaque ouvrage producteur, pas de calcul de la transmissivité, ni du débit spécifique.

Ce dernier (symbole : Q sp.) exprime la quantité d'eau qu'il est possible d'extraire (m<sup>3</sup>) par unité de temps (h) et par mètre de rabattement (« s »). Ce paramètre ne dépend que de l'aptitude de la roche (pas-

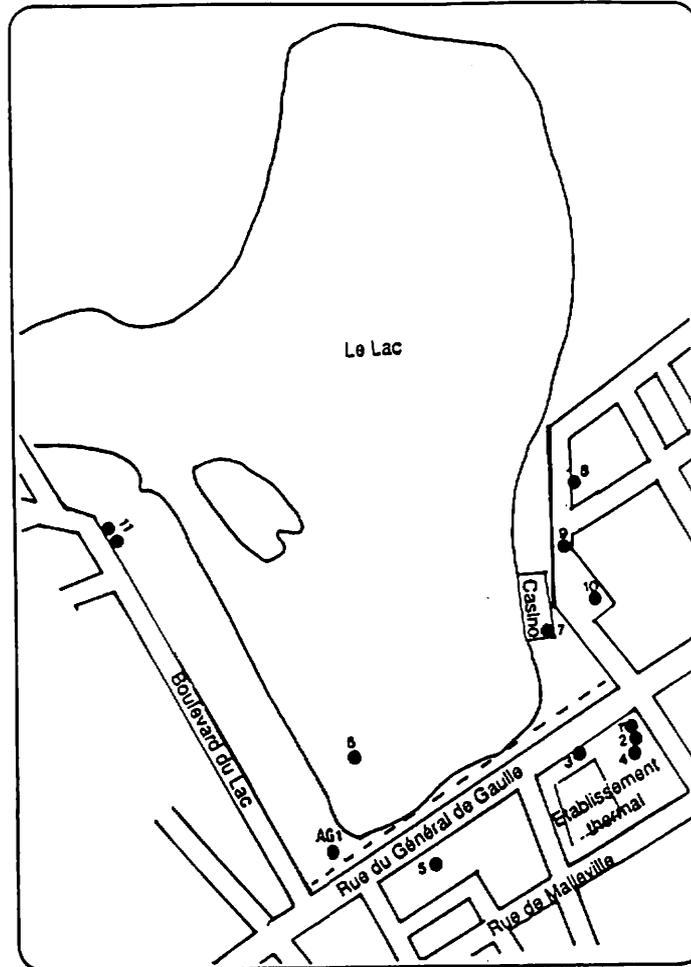


Fig. 25. - Situation topographique des sources d'Engien-les-Bains.

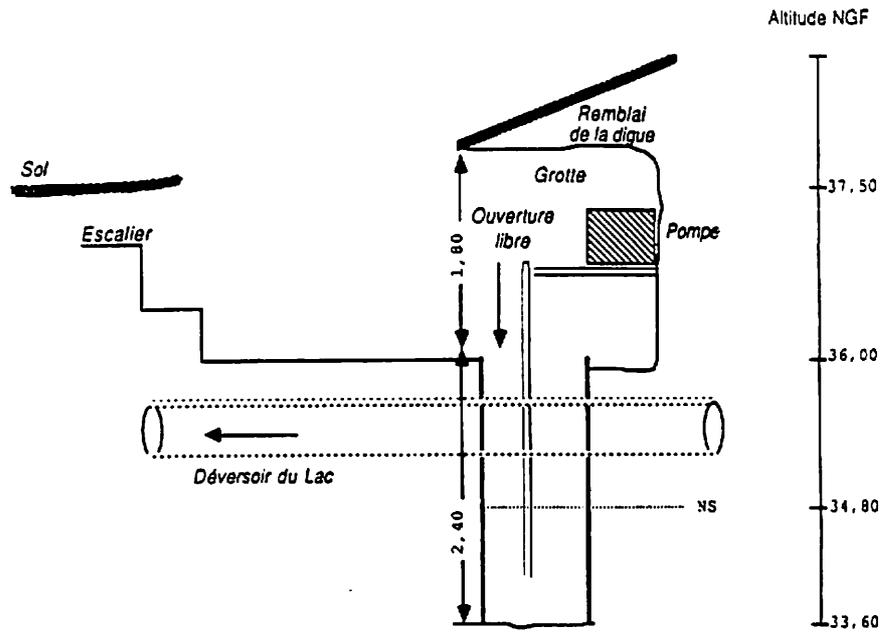


Fig. 26. - Captage de la source Pêcheurie (Éch. approximative 1/50).

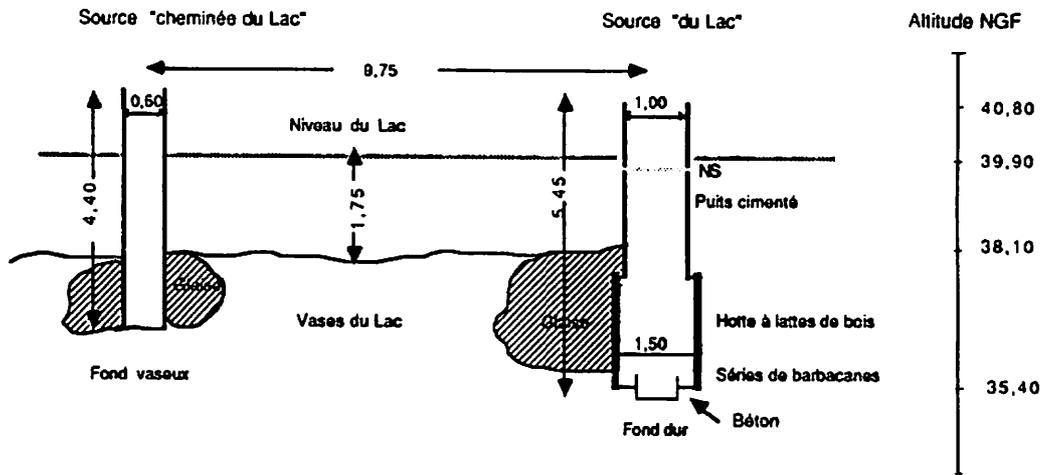


Fig. 27. - Captage de la source « Lac » (Éch. approximative 1/100).

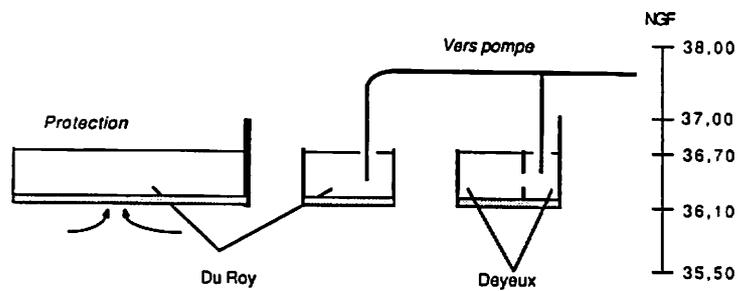


Fig. 28. - Captage des sources « du Roy » et « Deyeux » (Éch. approximative 1/50).

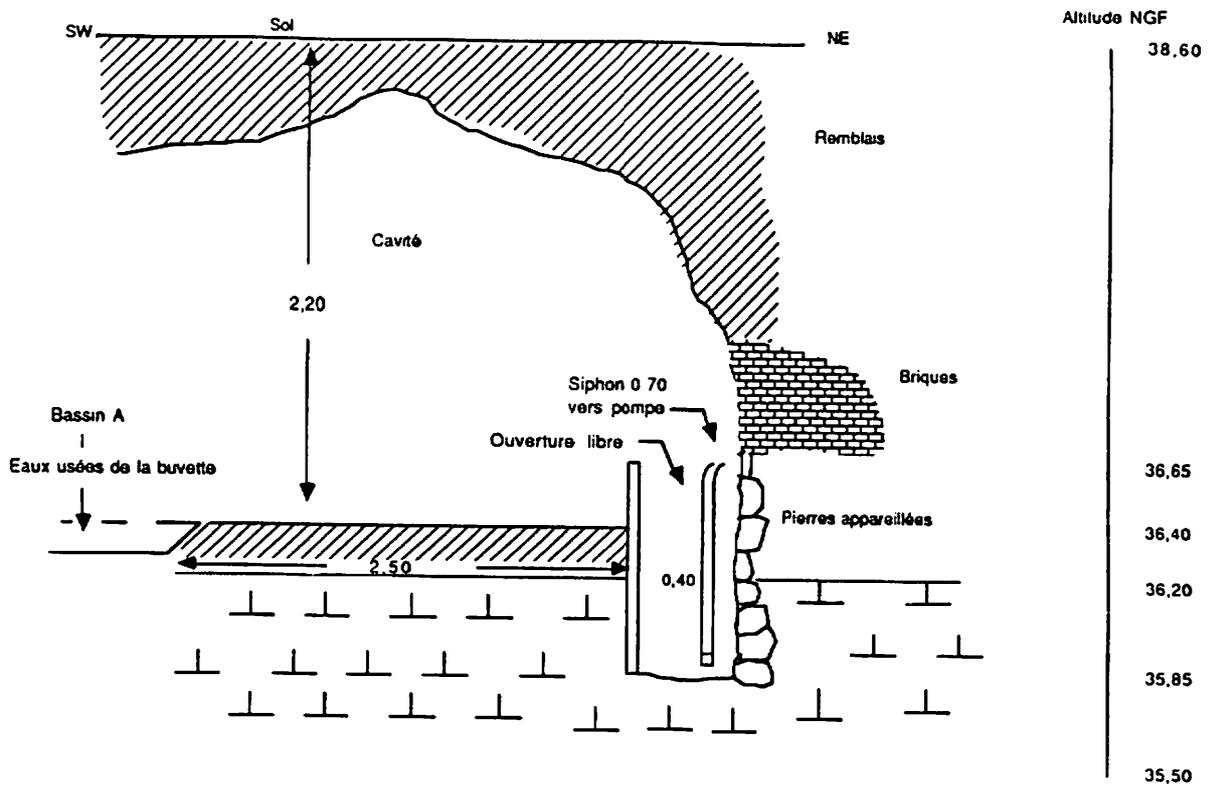


Fig. 29. - Captage de la source Bouland (Éch. approximative 1/20).

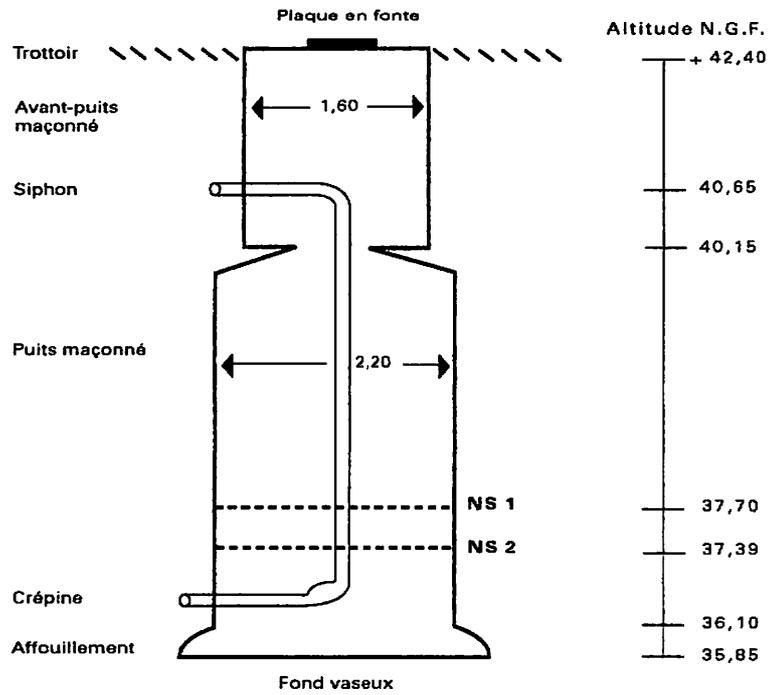


Fig. 30. - Captage de la source Coquil (Éch. approximative 1/50).

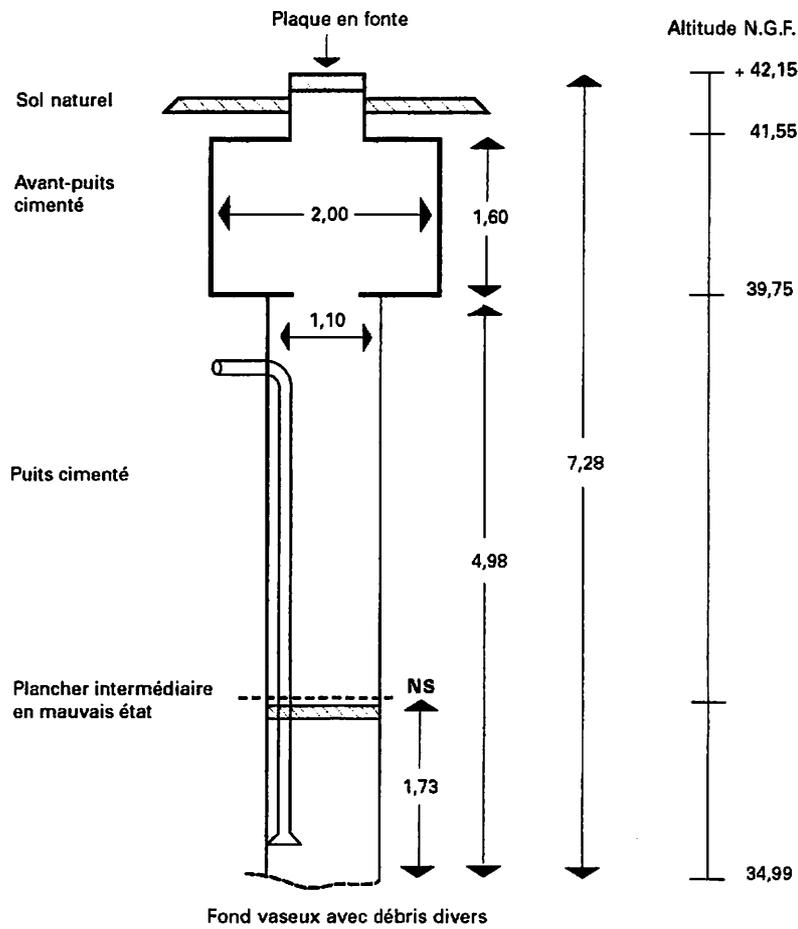


Fig. 31. - Captage de la source Péligot - État en 1969 (Éch. approximative 1/50).

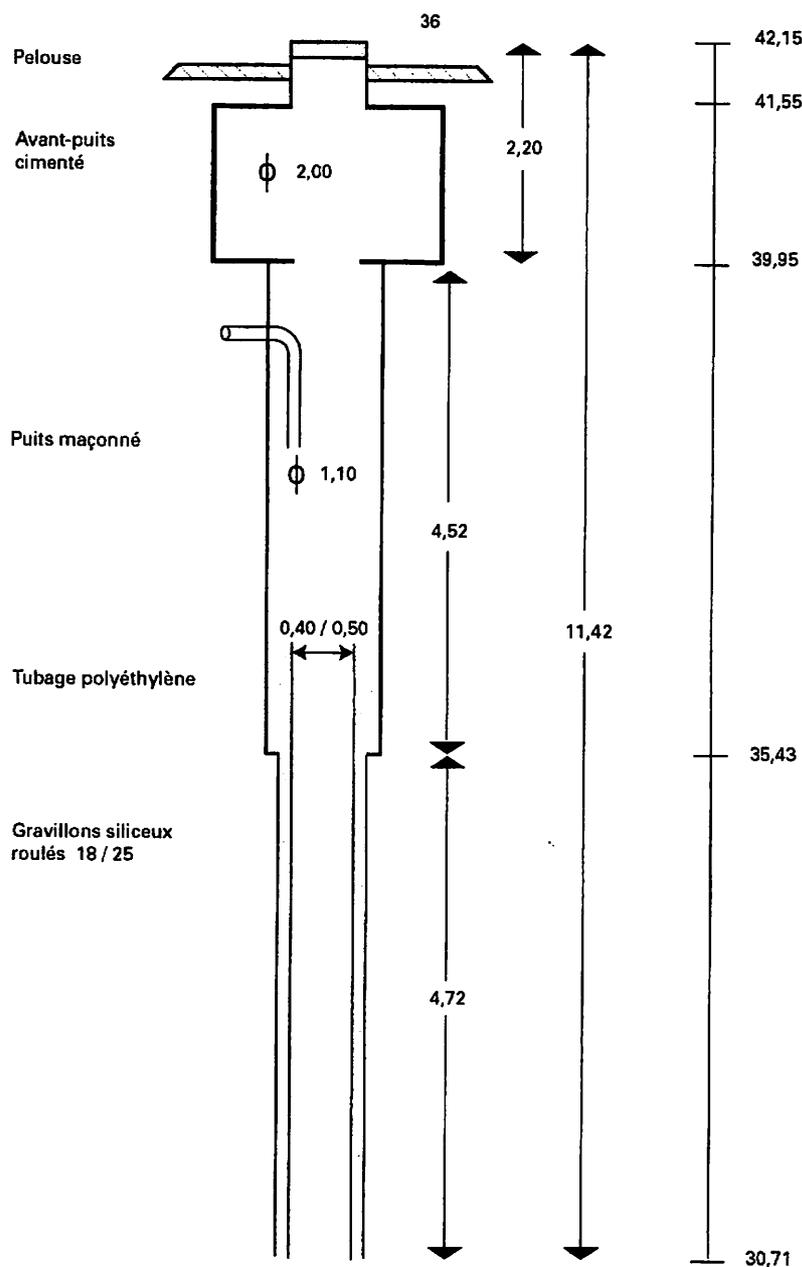


Fig. 32. - Captage de la source Pélégot - État en 1977 (Éch. approximative 1/50).

sive) à se laisser traverser par l'eau (active) sous une vitesse donnée, calculée par le biais de la transmissivité.

Les auteurs anciens évaluaient à 20m<sup>3</sup>/j le débit des sources réunies. Des valeurs plus importantes ont été avancées ; elles ne sont pas vérifiables. Depuis 1976, le débit de Coquil 3 tombé à 3 m<sup>3</sup>/h est une grave préoccupation (fig. 35).

#### Composition chimique

Notre démarche consiste à aborder l'hydrogéochimie en trois étapes hiérarchisées chacune étant complémentaire de la précédente.

Les observations recouvrent la période 1964-87, suffisamment longue à raison de deux analyses/an, pour que des imperfections résultant de l'évolution des

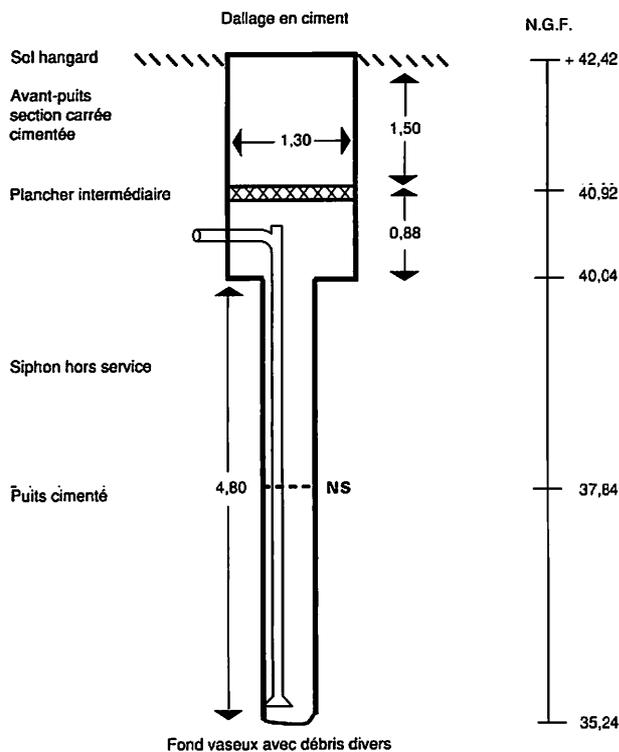


Fig. 33. – Captage de la source du Nord (Éch. approximative 1/50).

techniques, de l'appareillage et de la multiplicité des intervenants soient effacées par le nombre élevé des points figuratifs.

### Représentation graphique

Le report des résultats donne une image **unidimensionnelle** de l'évolution des paramètres sur la période ; l'exemple de la figure n° 40-C consacrée à la résistivité suffit à démontrer que l'allure du graphe en hausse constante, traduit un appauvrissement progressif et ininterrompu de la minéralisation globale.

Les graphes des sulfates et des bicarbonates suivent une évolution comparable.

Nous avons dessiné les graphes de toutes les sources archivées et choisi pour ne pas encombrer le texte par la multiplicité d'illustrations répétitives, l'exemple significatif de la source Coquil 3 parce qu'elle est la seule qui soit encore exploitée actuellement. Les autres sont abondonnées, réputées asséchées ou inaccessibles.

### Cartes en courbes équipotentielles

Principe : les valeurs de chaque paramètre mesuré sont reportées sur un plan à l'échelle à l'emplacement exact de la source. Les points figuratifs sont reliés par une courbe de concentration égale à 50, 100, 200, 500 mg/l. Ces courbes sont sinueuses, le plus souvent

ouvertes, rarement fermées sur elles-mêmes comme c'est le cas pour l'ion chlore (fig. 36, 37).

Cette carte montre un classement centrifuge des courbes d'égale concentration en chlore des chlorures. L'environnement de la courbe 50 mg/l est plus concentré que le centre du dispositif de l'aire hydrominérale.

Il faut donc imaginer, ce que propose le bloc-diagramme observé en perspective, qu'une fissure distendue s'aligne selon le plus grand axe de l'ellipse, déverse une eau infiltrée dans un rayon qui se mesure en kilomètres, gagne une profondeur toute relative et revient au jour faiblement pressurisée en produisant un effet de dilution autour d'elle. D'où le classement en orbites elliptiques de valeur croissantes des équipotentielles 55-60-65. La déformation observée aux points 52-58-60-60 est due à une autre fissure, de moindre importance.

Ainsi, l'interprétation **bi-dimensionnelle** [23] des résultats analytiques sur un champ hydrominéral à sorties multiples, peut-elle être la source d'une vision dynamique de la circulation des eaux.

Commentaire de la figure 37.

– A) La géométrie des courbes est influencée par une arrivée d'eau sous pression empruntant le canal d'une fissure ouverte. La courbe 350 mg s'enfonce en coin dans un milieu plus pauvre en bicarbonates. En réaction, les courbes 300 et 250 mg se moultent sur l'expansion ampulliforme centrée sur le point 360 mg.

– B) L'arrivée d'eau véhiculant 200 mg d'ion sulfate fait irruption de la même façon dans un environnement plus concentré atteignant 400 mg.

### Interprétation tridimensionnelle

La superposition de toutes les cartes en courbes équipotentielles conduit à définir **trois directions** qui canalisent les écoulements souterrains.

Sont en compétition :

– la **nappe phréatique** normale des Calcaires de Saint-Ouen alimentée par les pluvio-lessivats ayant ruiselé le long des pentes de la butte de Montmorency ;

– une arrivée d'**eau plus profonde**, minéralisée, sulfurée et carbo-gazeuse.

L'aire hydrominérale d'Enghien-les-Bains se partage en trois domaines (fig. 38) :

– sulfate et chlorures se déplacent *per descensum*, arrivant dans le périmètre hydrominéral simultanément par le NE et le SE ;

– sulfures et bicarbonates suivent une dynamique opposées *per ascensum* ; ils arrivent par l'ouest :

– le gaz carbonique issu du socle granitique vers 1 050-1 100 m de profondeur est le **moteur ascensionnel** des eaux profondes, minéralisées au passage par la corrosion des calcaires jurassiques et crétacés.

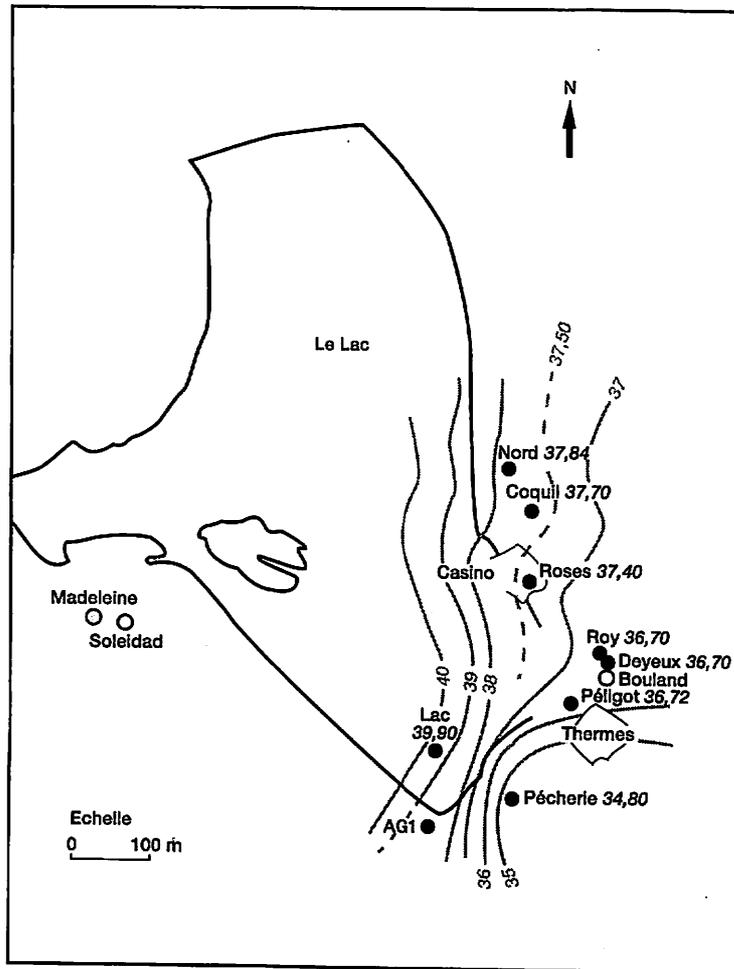


Figure 34. - Carte piézométrique des sources sulfurées à Enghien-les-Bains.

Il s'élève le long de la charnière et se dissipe. Il ne s'agit pas d'une exception ponctuelle propre au site d'Enghien-les-Bains, mais d'un processus d'ordre général concernant la plaque continentale hercynienne tout entière.

La fissuration n'est pas anarchique mais structurée : il s'agit d'une diaclase qu'il convient de se représenter comme un assemblage de livres ouverts, adossés.

Les flux circulent entre les feuillet distendus.

### Le gypse et la sulfuration

Le désordre règne dans les approches des eaux sulfurées. Celles-ci ont d'abord été classifiées calciques et sodiques, puis, des auteurs se sont engagés sur la voie de la recherche des causes de la sulfuration.

Dans cet esprit, Astrie écrivait en 1852 [3] : « elles (les eaux sulfurées) sourdent d'un banc calcaire très friable dans certaines parties, et paraissent prendre leur principe sulfureux à un banc de gypse, par la décomposition réciproque du sulfate-calcaire et des matières organiques qui l'accompagnent. L'on montre aux visiteurs de petits fragments " pierreux où s'est fait un dépôt de soufre " ».

Ce qui revient à confondre le stade terminal de l'oxydation du soufre et l'hydrogène sulfuré qui trouve sa place en tête de tous les processus d'oxydation ultérieure. À un siècle et demi de distance, les légendes ont la vie dure.

De cette époque comme des décennies qui suivront, nous n'avons trouvé aucune description de coupe de terrain si réduite soit-elle. Il devait pourtant en exister puisque l'urbanisation n'avait pas encore enseveli le terrain naturel.

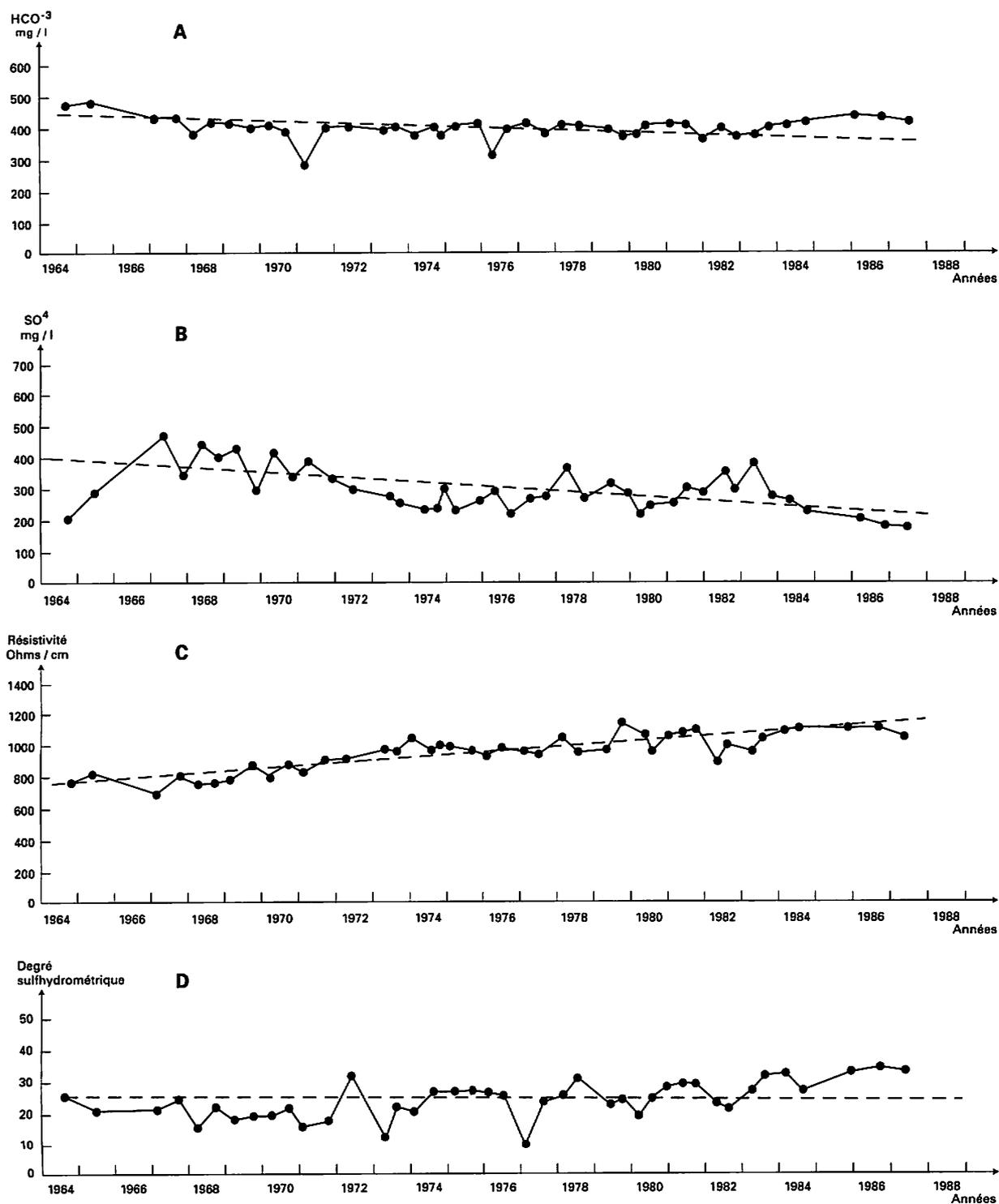


Fig. 35. – Source Coquil. Période d'observation : 1964-1987. A) Évolution de la concentration en HCO<sup>3-</sup>. B) Évolution de la concentration en SO<sup>4</sup>. C) Évolution de la résistivité. D) Évolution du degré sulhydrométrique.

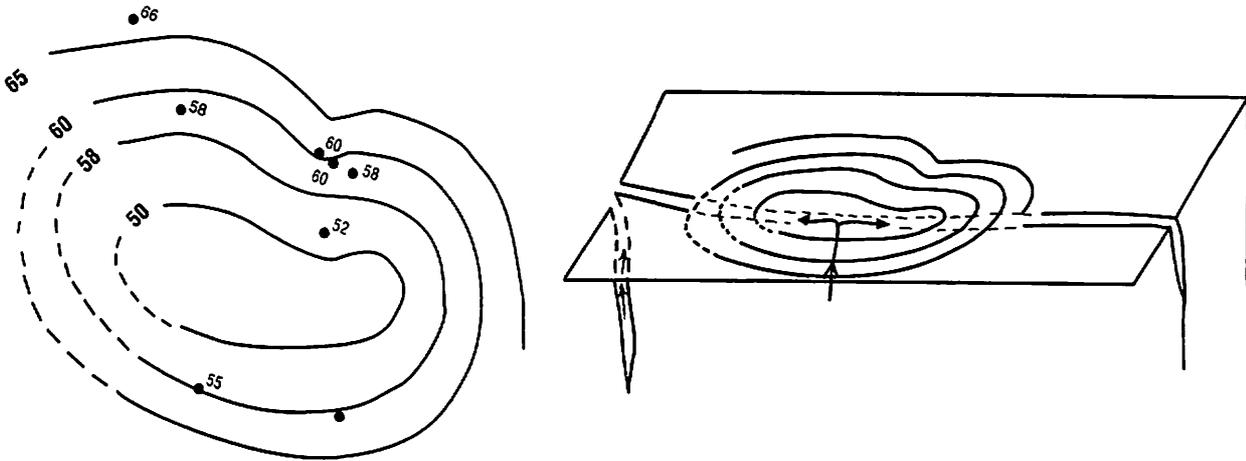
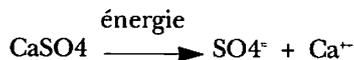
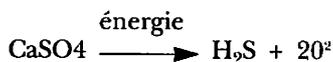


Fig. 36. – Courbes d'isoconcentration  $\text{Cl}^-$ . A) Novembre 1964. B) Bloc diagramme.

En admettant que du gypse cristallisé ait été présent à proximité des sources, ce minéral étant ionisé dans sa dissolution aqueuse, il est permis d'écrire l'équation de dissociation :



Mais il est interdit d'écrire :



Réduire  $\text{SO}_4^{2-}$  en  $\text{S}^0$  est un autre problème exigeant une énergie considérable eu égard à celle dont dispose la compétition ionique en solution aqueuse.

Nous savons par contre que l'eau est

– à l'équilibre :  $7 < \text{pH} < 7,2$

(après contrôle quotidien) ;

– bicarbonique :

=  $\text{CO}_2$  libre simplement dissout s/forme  $\text{H}_2\text{CO}_3$

=  $\text{CO}_2$  équilibrant s/forme  $\text{HCO}_3^-$ .

Dans ces conditions :

– l'hydrolyse du gypse conduit à la libération d'une base faible :  $\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2$  et,

– pH doit dériver jusqu'à 9,2,

– la base faible réagit avec le diacide (faible), dépose du carbonate de calcium. pH doit revenir à 8,3.

Rien de semblable n'est observé. Le gypse participe simplement et modestement à la minéralisation de base de l'eau qui trouve ailleurs sa sulfuration.

### Rôle de la tourbe

La tourbe est une formation superficielle édifée par des végétaux inférieurs remarquables par leur croissance continue. Ces organismes sont exigeants : ils ne se développent que dans des eaux très pures, à l'écart de toute pollution.

Deux sortes de situations sont connues :

– les tourbières acides : *Polytrich*, *Sphagnum* s'installent sur un *substratum* granitique, en eau vive, hypomérialisée, à  $3,8 < \text{pH} < 4,5$ . Exemples : Vosges, Ardennes, Bretagne ;

– les tourbières alcalines à *Bryum* préfèrent un *substratum* marno-calcaire ou franchement calcaire ; exemple : hortillons de la basse vallée de la Somme.

Dans l'un comme dans l'autre cas, le rouissage des parties anciennes mortifiées conduit à un combustible pauvre : la tourbe.

La vase qui encombre les rives d'un ruisseau traversant la région très urbanisée, Eaubonne-Saint-Gratien-Enghien, ne peut être assimilée à de la tourbe.

Conclusion : une confusion est établie entre une vase limnique et les conditions requises pour permettre le développement d'une tourbière dont les exigences écologiques sont très précises, irréalisables en ville.

### Sulfures métalliques et sulfuration des eaux minérales

Le groupe des pyrites réunit divers sulfures métalliques (pyrite *stricto sensu* ; blende, galène, cinabre, chalcopryrite) qui se rencontrent dans tous les

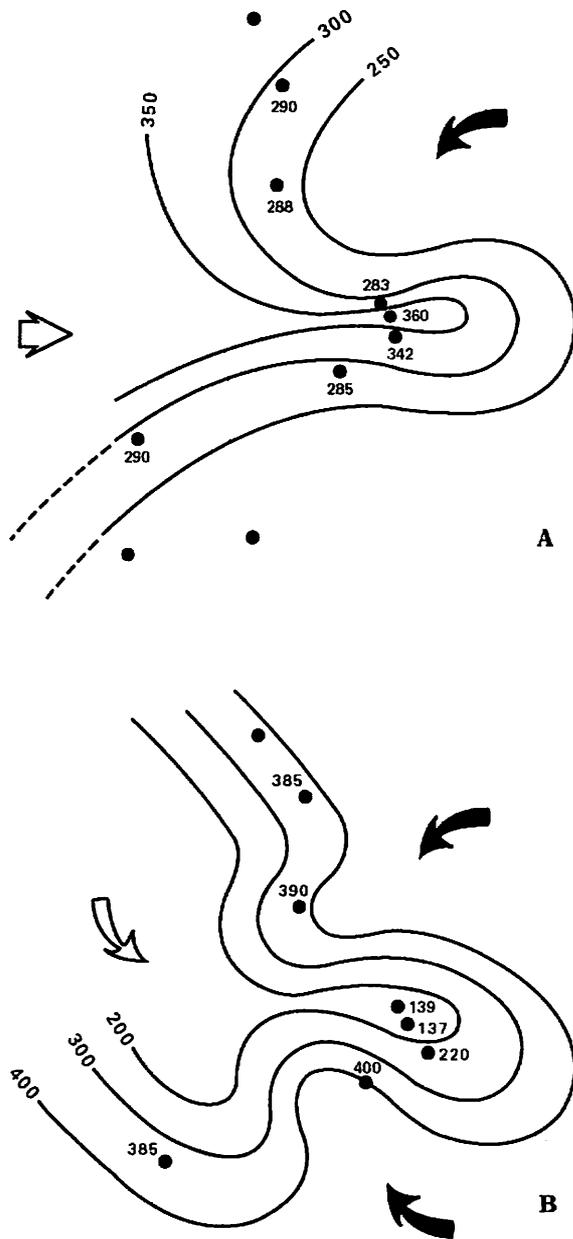


Fig. 37. – Courbes d'isoconcentration ionique. A) Bicarbonates, avril 1971. B) Sulfates, avril 1971.

domaines pétrographiques, cristallin, métamorphique, filonien et sédimentaire, ce qui est le cas d'Enghien-les-bains.

La pyrite de fer est la plus commune, présente dans les calcaires (marcassite de la craie de Champagne) comme dans les marnes du jurassique auxquelles elle impose une coloration gris-foncé caractéristique.

De formule  $S_2Fe$ , la pyrite est remarquable par trois caractères :

- insolubilité stricte dans l'eau,
- sublimation : le soufre sublime dans les conditions de l'hyper-criticité, au-delà de 225 hPa et 450°C. Il peut

*Presse thermique et climatique*, 1998, 135, n° 2

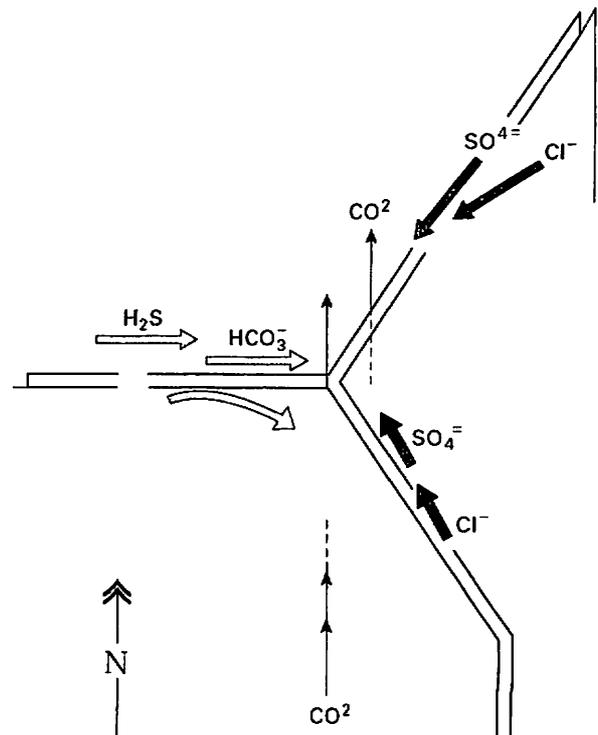


Fig. 38. – Mode de circulation des eaux phréatiques et minérales sulfurées dans l'aire hydrominérale d'Enghien-les-Bains.

condenser dans l'eau du réseau fissural et générer de l'hydrogène sulfuré hydrosoluble,

– hydrolyse libérant les ions  $S^{\ominus}$  et  $Fe^{\oplus}$ . Le processus étant oxydatif, le soufre conduit à l'ion sulfate, le métal floccule sous forme hydroxylée.

L'évolution de la pyrite ne conduit pas à la sulfuration des eaux souterraines. Il faut rechercher une explication différente et plus cohérente.

#### Apports de la synthèse au four électrique

Les eaux minérales sulfurées intriguent. Jaillissent-elles de préférence dans la proximité des volcans ? Rien n'est moins sûr.

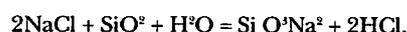
À la fin du précédent siècle, la synthèse au four électrique est en plein développement. Durocher, Freymy et Gautier (cités par Jadin [27]) s'efforcent de produire du sulfure de sodium.

Pour y parvenir, ils écrivent une longue séquence de réactions dont la faiblesse est de ne pas être conformes aux lois de la thermodynamique. Elles ne peuvent donc pas se dérouler. Au surplus, il n'est pas concevable qu'un acide faible (sulfhydrique) cohabite avec son sel (sulfure de sodium).

La démonstration des auteurs n'est pas applicable au domaine des eaux naturelles notamment dans un environnement sédimentaire.

**Réactions donnant naissance aux eaux sulfureuses sodiques****EAUX MINÉRALES**

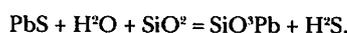
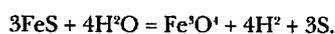
Au rouge vif, dans les profondeurs et en présence de la vapeur d'eau et de la silice, le chlorure de sodium donne :



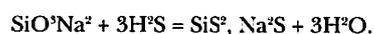
De la même manière se formeraient des silicates de calcium, de magnésium, d'aluminium, etc.

Ces derniers, par union avec les silicates alcalins, donnent des silicates doubles et triples.

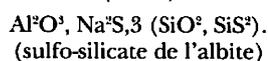
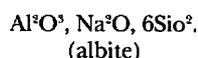
Mais la vapeur d'eau, au rouge, provoque avec les sulfures des réactions comparables à celles-ci :



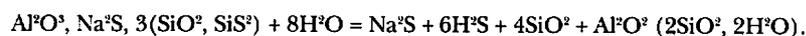
L'hydrogène sulfuré agissant sur les silicates simples, doubles ou triples, donne des sulfo-silicates :



Parmi ces sulfo-silicates, celui qui est obtenu avec l'albite correspond à la composition :



Ces sulfosels persistent dans les profondeurs ; plus haut, lorsque l'eau peut se liquéfier, ils sont décomposés à leur tour en fournissant les éléments des eaux sulfureuses (sulfures alcalins, hydrogène sulfuré, silice hydratée, argile) :



C'est un sulfo-silicate semblable qui doit se former, en petite quantité, dans les régions internes du sous-sol.

**Hypothèse sur la formation simultanée du sulfure de sodium et de l'hydrogène sulfuré : A. Gautier (cité par Jadin-Astruc, p. 337).**

Composition chimique de l'eau

- Majeurs ;
- mineurs ;
- traces ;
- radionuclide ;
- gaz thermaux.

Genèse de l'eau minérale à Enghien-les-Bains

La composition du flux hydrominéral n'est pas une, mais polygénique. Cette constatation est le grand progrès accompli au cours de nos recherches intégrées au cadre minéralogique, pétrographique et structural du Bassin de Paris.

D'où les difficultés qui ont dû être surmontées au plan analytique et la raison impérieuse pour laquelle

il faut tenir les eaux d'Enghien à l'écart de toute survivance de classification obsolète.

Les héritages géochimiques qui contribuent à l'originalité des eaux d'Enghien, comme ce serait le cas pour toute autre station, se classent de la façon suivante :

6) Émergence :

- dénaturation du soufre réduit : Thiosulfates et sulfites,

- dissipation du gaz carbonique (résiduel de : 40-70 mg/l),

- géothermalité : à peine perceptible,

- pression hydrostatique : essoufflée,

- sulfuration : importante en S minéral et organique :

- minéralisation, de complément, autochone, apportée après déversement dans la nappe phréatique des Calcaires de St-Ouen.

- 5) Environnement urbain :  
 – distribution eau potable : effet dilution,  
 – assainissement : pollution(s) anthropique,  
 – grands travaux urbains incontrôlés.
- 4) Thanétien :  
 – acquisition de la sulfuration minérale et organique,  
 – détente du CO<sub>2</sub>, production de frigories, perte de géothermalité.
- 3) Crétacé + Jurassique :  
 – corrosion des formations calcaires, karstification de la craie, acquisition d'un pouvoir-tampon.
- 2) Minéraux d'altération du socle :  
 – sables, et grès continentaux, nappe aquifère sous pression.
- 1) Socle cristallin :  
 – géothermalité élevée +/-40°C,  
 – dégagement de CO<sub>2</sub> crustal moteur ascensionnel des eaux profondes,  
 – pression environ 150 hPa,  
 – produits de l'hydrolyse des feldpaths,  
 – mise en circulation de la silice.

## BIBLIOGRAPHIE

Nota : les références notées \* renvoient à une bibliographie détaillée propre à l'article cité.

1. Abrard R. – Étude hydrogéologique du Bassin de Paris. *Annales des Mines*, mai-juin 1937. Paris, Dunod, 1937.
2. Abrard R. – *Géologie du bassin de Paris*. Paris, Payot, 1950.
3. Astrie G. – *La médication thermique sulfurée*. Paris, Librairie de la Faculté de Médecine, 1852.
4. Raugier. – *Traité des eaux minérales d'Attancourt-en-Champagne, avec quelques observations sur les eaux minérales de Sermaize*. Chalons, Edme Seneuze éd., Le Pont-de-Nau, 1696.
5. Bergerat F. – *Déformations cassantes et champs de contrainte tertiaires dans la plate-forme européenne*. Doc. Sc. Nat., Université, n° 85.07, P. et M. Curie, 27 février 1985.
6. Bigot A. – Hydrologie du Calvados. *Bull. Serv. Carte Géologique de la France*, N° 230, 48, 1950.
7. Bleicher M. – Nouvelle découverte de fossiles dans les poulingues du Grès vosgien et faits relatifs à la dénudation des Vosges et des Alpes. *Bull. mensuel des séances de la réunion biologique de Nancy*, 1901.
8. Braconnier M.A. – *Description des terrains qui constituent le sol du département de la Meurthe-et-Moselle*. Nancy, 1879.
- 9\*. Bussièrès J.L. – *Contribution à l'étude de la source minérale de Châteaueu-Gontier (53)*. I. Mémoire (67 p., 11 fig., 1tb), Université Paris-Sud, Chatenay-Malabry, 27.05.1975.
10. Buvignier A. – *Statistique géologique, minéralogique, minéralurgique et paléontologique du département de la Meuse*. 1852, Paris (1 vol + Planches).
11. Chantereau J. – *Corrosion bactérienne. Technique et documentation*. Paris, Rue Lavoisier, 1976.
12. Chevillon, Odilon, Calloud. – *Fontaine des Sarrazins à Sermaize*. Paris, 1851.
13. Clin M., Laugier R., Millot G. – Un profil des grès vosgiens le long de la vallée de la Meurthe. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1957, 6<sup>e</sup> série, 1015-1024.
14. Corroy G. – *Étude stratigraphique et tectonique des régions nord du seuil de Bourgogne et du bassin des eaux minérales vosgiennes*.
- 15\*. Dague Ph. – *Étude géologique et hydrogéologique de la nappe des Grès du Trias inférieur dans l'est de la France*. Thèse Nancy, 1. VII. 1969 (2 vol.).
16. Daubrée A. – *Description géologique et minéralogique du département du Bas-Rhin*. Strasbourg, 1852.
- 17\*. Dupin T. – *Les diatomées commensales des eaux géothermales. Analyse bibliographique et essai de culture in vitro*. Travaux du laboratoire d'Hydrologie, Université Paris-Sud, juin 1977.
- 18\*. Dupuy F. – *Étude structurale de l'Eocène détritique dans l'espace de l'Île-de-France*. Rapport stage IGAL, 1997.
19. Durand Fardel, Le Bret E., Lefort L. – *Dictionnaire des eaux minérales*, T. I-II. Paris, Baillières, 1860.
20. de Beaumont E. – Note sur l'uniformité qui règne dans la composition de la ceinture du grand bassin géologique qui comprend Londres et Paris. *Ann. Sc. Natl.*, Paris, 17, *Ann. des Mines*, T. 10, 1829.
- 21\*. Epifanoff P. – *Les cyanophytes thermophiles. Recherche bibliographique et essais de culture in vitro*. Mémoire (65 p., 12 fig.). Laboratoire d'Hydrologie, université Paris-sud, juin 1977.
- 22\*. Gauvin B. – *Recherche sur l'origine et les conditions de gisement des eaux minérales de la Roche-Posay à travers l'examen de leurs caractères physico-chimiques*. Thèse pharm., Université Paris-sud, 12.07.1984. (147 p., Fig).
- 23\*. Gesteau-Auriol M.I. – *Étude du patrimoine hydrominéral de la ville d'Enghien-les-Bains*. Thèse de Pharm., N° 228-83, Université Paris-Sud. 3.VII.1990.
24. Gignoux M. – *Géologie stratigraphique*. Paris, Masson.
25. Henry O. – *Bagnoles-de-l'Orne*. Alençon, 1861.
26. Jacquot-Willm. – *Les eaux minérales françaises*.
27. Jadin F., Astruc A. – *Précis d'Hydrologie et de Géologie*. Paris, 3<sup>e</sup> éd. Maloine, 1932.
28. James C. – *Bagnoles-de-l'Orne, Les seules eaux minérales sulfureuses du Nord de la France*. Alençon.
29. Jannel Ch. – *Études géologiques des lignes de chemin de fer de la région Est*. Fascicule : Hymont-Mattaincourt - Jussey, 1872 (Diffusion restreinte).
- 30\*. Kadouch C. – *L'eau minérale « La Limpide » à Laneuveville-aux-Bois*. Mém. (91 p.), travaux laboratoire Hydrologie, université Paris-sud, 1976.
- 31\*. Laugier R. – Ressources hydrologiques du département de la Meuse. *Bull. Institut Nat. Hygiène*. Avril-juin 1957, 11, n° 2, 457-526.
32. Laugier R. – Ressources hydrologiques du département des Vosges. *Ibid.*, Jul.-Aug. 1961, 15, n° 4, 798-833.
33. Laugier R. – *Le Lias inférieur et moyen du nord-est de la France*. Thèse Sciences, Nancy, 23.IV.1964.
34. Lecoq H. – *Les eaux minérales considérées dans leurs rapports avec la chimie et la Géologie*. Paris, J. Rothschild éd., 1864.
35. Levallois J. – Identité des formations qui, dans la Lorraine et dans la Souabe, séparent le Lias du Muschelkalk. *Mem. Soc. Géol. France*, Paris, 1864.
- 36\*. Megnien Cl., Horon, Soyer R. – Note sur les Fontaines Salées à St-Père-sous-Vézelay. *Bull. Soc. Géol. France*, 7<sup>e</sup> série, 1959, 1, 461-466.
- 37\*. Minoux G. – Observations nouvelles sur la couverture triasique et son substratum dans la région occidentale des Vosges. Les Forages de Vittel, Lamarche et Contrexéville. *Bull. Soc. Géol. France*, 1958, 6<sup>e</sup> série, 213-236.

38. Minoux G., Ricour J., Waterlot. – Le nouveau forage effectué à l'établissement thermal de Saint-Amand-les-Eaux (Nord) en 1954. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 1957, Lille, 67, 219.
  - 39\*. Pellarin N. – *La station de Bagnolles-de-l'Orne. Etude bibliographique.* Mém. (102 pages, 12 figures, IX tbc), Travaux du laboratoire d'Hydrologie, Université Paris-sud, 7 mai 1976.
  - 40\*. Pierrot A. – Les eaux médicinales de Saint-Dié. Étude historique et scientifique. *Bull. Sté Philomatique vosgienne*, Épinal, 1929-30.
  41. Pomerol Ch., Feugueur L. – *Bassin de Paris-Ile de France.* Paris, Collection Guides géologiques régionaux, Masson, 1974.
  42. Sauvage E. – Notice sur les sources minérales des départements de Seine-et-Oise, Seine-et-Marne et du Loiret. *Ann. des Mines* (23 pages), juillet-août 1880, Dunod, Paris.
  43. Soyer R. – *Géologie de Paris.* Paris, Imprimerie nationale, 1953.
  44. Urbain P. – *Géochimie et Hydrogéologie des enveloppes aqueuses et des eaux minérales.* Paris, Librairie des Sciences et techniques, 9, rue Médecis, 1967.
  45. Ville d'Enghien-les-Bains. Archives municipales, Projet BIP, 1996.
  46. *Colloque sur le Lias français.*
  47. *Colloque sur le Trias français et les régions limitrophes 1960.* Nancy-Montpellier 1961.
  48. *Colloque « Seuls ».*
  49. *Colloque sur le Crétacé français.*
  50. Nestlé SA, Laboratoire de contrôle et de Recherches à Vittel et Contrexéville.
-

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

*La Presse Thermale et Climatologique* publie des articles originaux concernant le thermalisme et le climatisme, et des travaux présentés devant la Société Française d'Hydrologie et de Climatologie médicales et éventuellement dans les séances de Formation Médicale Continue, soit sous forme de résumés soit sous forme intégrale. La Presse Thermale et Climatologique présente également des informations générales concernant le climatisme et le thermalisme ainsi que des informations sur la vie des stations.

## CONDITIONS DE PUBLICATION

Les articles originaux, ainsi que le texte intégral des communications à une Société d'Hydrologie ne peuvent être publiés qu'après avis d'un Comité de Lecture.

La longueur du manuscrit, non comprises les références bibliographiques et l'iconographie, ne peut dépasser 8 pages dactylographiées (double interligne). Les textes doivent être rédigés en français, sauf exception motivée par l'importance scientifique du texte auquel un résumé en français devra être alors obligatoirement associé. Seul le Comité de Rédaction peut décider de l'opportunité de cette publication.

Les manuscrits en triple exemplaire (y compris les figures et les tableaux) doivent être adressés au secrétariat de rédaction de la Presse Thermale et Climatologique. Les articles ne doivent pas être soumis simultanément à une autre revue, ni avoir fait l'objet d'une publication antérieure.

## TRAVAUX SUR DISQUETTE INFORMATIQUE

Les travaux doivent, préférentiellement, être adressés sur micro-disquettes (double face-haute densité) format 3 P 1/2 en utilisant le traitement de texte Word ou Mac Write pour *Macintosh*, accompagnées d'une sortie imprimante.

## PRESENTATION DES TEXTES

### Manuscrit

– Trois exemplaires complets du manuscrit saisi avec une marge de 5 cm à gauche, 25 lignes par page avec numérotation doivent être fournis sous forme de sortie imprimante d'excellente qualité.

– Le titre précis doit être indiqué sur une page à part qui doit comporter également les noms des auteurs et les initiales de leurs prénoms. Sur la page de titre figurera le nom de la Station ou

du Centre de Recherche, le nom et l'adresse complète de la personne qui est responsable de l'article, et les mots clés en français et en anglais choisis si possible dans l'index Medicus.

### Références

Elles doivent être classées par ordre alphabétique, numérotées et tapées en double interligne sur une page séparée ; il ne sera fait mention que des références qui sont appelées dans le texte ou dans les tableaux et figures, avec le même numéro que dans la page de références.

Pour les articles, on procédera de la façon suivante :

- nom des auteurs suivi de l'initiale du ou des prénoms (s'il y a plus de trois auteurs, on peut remplacer les noms par : et coll.) ;
- titre du travail dans la langue originale ;
- nom de la revue si possible en utilisant les abréviations de l'index Medicus ;
- année, tome (ou vol.), pages (première et dernière).

### Exemple :

Grandpierre R. – A propos de l'action biologique de la radioactivité hydrominérale. *Presse therm. clim.*, 1979, 116, 52-55.

### Pour les ouvrages :

- nom des auteurs suivi de l'initiale du ou des prénoms ;
- titre de l'ouvrage dans la langue originale avec mention éventuellement du numéro de l'édition ;
- ville d'édition, nom de l'éditeur, année de parution.

### Exemple :

Escourou G. – *Climat et environnement*. Paris, Masson, 1989.

### Pour un chapitre dans un ouvrage :

- nom des auteurs suivi de l'initiale du ou des prénoms ;
- titre de l'article dans la langue originale. Ajouter *In* : nom de l'auteur, initiale du ou des prénoms, titre du livre, pages de l'article ;
- ville d'édition, nom de l'éditeur, année de parution.

### Exemple :

Merlen J.F. – Les acrosyndromes. *In* : Caillé J.P., *Phlébologie en pratique quotidienne*, pp. 505-542. Paris, Expansion Scientifique Française, 1982.

### Abréviations

Pour les unités de mesure et de chimie, elles doivent être conformes aux normes internationales ; pour les mots,

l'abréviation doit être indiquée à leur premier emploi, entre parenthèses. S'il y a trop d'abréviations, elles doivent être fournies sur une page séparée.

### Figures et tableaux

Les illustrations doivent être limitées à ce qui est nécessaire pour la compréhension du texte.

Les illustrations doivent être appelées dans le texte par leur numéro (en chiffre arabe pour les figures, en chiffre romain pour les tableaux).

Chaque tableau ou figure constitue une unité qui doit être compréhensible en soi, sans référence au texte.

Chaque figure doit être numérotée au dos ; le haut et le bas, ainsi que le titre abrégé et les limites à reproduire doivent y être indiqués au crayon doux, ou mieux sur une étiquette au dos.

Les figures doivent être tirées sur papier glacé, bien contrastées. Nous acceptons des dessins même imparfaits, ils seront redessinés et vous seront soumis avant clichage ; nous n'acceptons pas les diapositives sauf pour les coupes histologiques.

Si une figure est empruntée à un autre auteur ou à une autre publication, l'autorisation de reproduction doit être obtenue auprès de l'éditeur et de l'auteur.

Les légendes des figures doivent être dactylographiées dans l'ordre sur feuille séparée.

Chaque tableau doit être dactylographié en double interligne sur une feuille à part (un tableau par feuille). Le numéro du tableau et de la légende seront dactylographiés au-dessus du tableau.

Les abréviations utilisées dans les tableaux, les figures ou leurs légendes doivent être définies à chaque tableau ou figure.

### Iconographie en couleur

Il sera demandé aux auteurs une participation forfaitaire de 8 000 F Hors Taxes par page.

### Résumés

Les résumés, qu'ils accompagnent un article original ou qu'ils soient fournis seuls (cas des communications à la Société d'Hydrologie qui n'ont pas été soumises au comité de lecture) doivent être fournis en triple exemplaire. Ils doivent comporter un maximum de 250 mots sans abréviation ni référence. Les auteurs doivent fournir si possible un résumé en anglais représentant une traduction du résumé français.



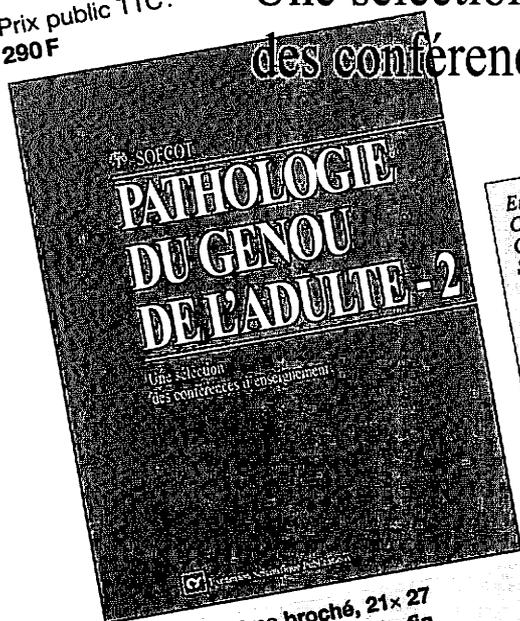
SOF COT

# PATHOLOGIE DU GENOU DE L'ADULTE - 2

Prix public TTC:  
290 F

Une sélection  
des conférences d'enseignement

sous la direction  
de J. DUPARC



volume broché, 21 x 27  
206 p., nombreuses fig.

*En 1992 paraissait le premier Cahier de regroupement de Conférences d'Enseignement de la SOF COT consacré à la « pathologie du genou de l'adulte ». Le deuxième Cahier que nous publions maintenant regroupe donc des Conférences d'Enseignement de la SOF COT effectuées depuis.*

*Nous y avons inclus des conférences d'orthopédie pédiatrique qui nous paraissent avoir un intérêt général, même pour des orthopédistes s'occupant de l'adulte, des conférences sur la traumatologie osseuse et ménisco-ligamentaire et des conférences d'Orthopédie adulte concernant l'atteinte fémoro-patellaire, les prothèses fémoro-patellaires et enfin les prothèses totales du genou.*

#### Introduction

par H. OLIVIER

Les traumatismes du genou chez l'enfant,

par J. LECHEVALIER

L'instabilité rotulienne chez l'enfant,

par C. GARIN avec la collaboration de R. KOHLER

Fractures récentes de l'extrémité inférieure du fémur de l'adulte,

par C. CHIRON

Les fractures de la rotule (fractures sur prothèses exceptées),

par Ph. NEYRET

Les lésions des ménisques du genou et leur traitement actuel

par R.P. JAKOB

Chirurgie réparatrice des ménisques du genou,

par R. VERDONK

L'arthroscopie opératoire dans la pathologie mécanique du genou. Apport et

limites,

par P. BEAUFILS

Reconstruction du ligament croisé postérieur sous arthroscopie,

par M.F. MOONEY, T.D. ROSENBERG, L.E. PAULOS

Les syndromes rotuliens douloureux chez l'adulte,

par D. GOUTALLIER

Problèmes rotuliens des prothèses totales de genou semi-contraintes,

par J.H. AUBRIOT

L'état actuel des prothèses fémoro-patellaires,

par J. WITVOET

Les prothèses totales de genou difficiles de première intention,

par J.Y. NORDIN

Prothèses totales de genou infectées,

par M. MATHIEU



Expansion Scientific Publications

Bulletin de commande  
à retourner

**L'Expansion Scientifique  
Publications**

Service Diffusion  
15, rue Saint-Benoît  
75278 PARIS Cedex 06

Nom : \_\_\_\_\_

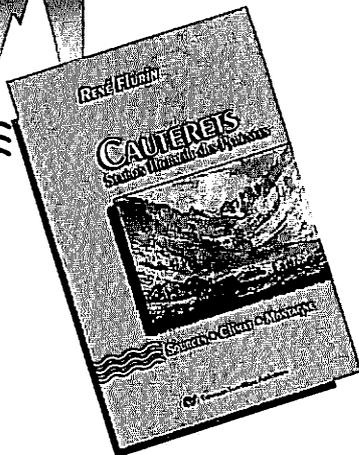
Adresse : \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

commande ..... ex. de « Pathologie du genou de l'adulte - 2 »  
au prix de 311 F Franco domicile.

Règlement joint :

Chèque bancaire

Chèque postal



# RENÉ FLURIN

avec la collaboration de François Boyrie  
et des Docteurs Pierre Jallet, Jean-François Pucheu  
et Michelle Séchan

## CAUTERETS STATION THERMALE DES PYRÉNÉES



### SOURCES • CLIMAT • MONTAGNE

**C**AUTERETS est né, a grandi, s'est développé autour des sources thermales et de leurs applications thérapeutiques. Aujourd'hui, plus qu'à aucune autre période de son histoire, le patrimoine naturel de Cauterets, modernisé et mis en valeur, le destine à devenir un modèle pour les stations thermales du 3<sup>e</sup> millénaire.

Au creux de sa vallée, se trouvent rassemblés un ensemble de facteurs naturels favorables à la santé :

- Des sources sulfurées abondantes, chaudes, variées, distribuées dans les établissements thermaux dotés de tous les équipements spécialisés dans le traitement des voies respiratoires et de la rhumatologie.

- Un climat de moyenne montagne, à la rencontre de plusieurs vallées, offrant une gamme étendue d'altitudes et de microclimats, de 900 à 3000 mètres. Cauterets est une station climatique classée.

- Des sites d'une beauté radieuse, aménagés et protégés dans le cadre du Parc National des Pyrénées Occidentales, faisant de Cauterets un centre montagnard de réputation internationale.

Ce livre présente un bilan de nos connaissances actuelles sur les sources sulfurées de CAUTERETS, leurs indications en médecine et les différentes méthodes de traitement en ORL, voies respiratoires et rhumatologie. Le lecteur trouvera également une synthèse sur le climat et l'environnement montagnard de la vallée.

Le travail est le fruit d'une longue expérience. Le docteur René Flurin a exercé pendant plus de 40 ans la médecine thermale à Cauterets ; ancien interne des hôpitaux de Paris, ancien chef de clinique, médaille d'or des eaux minérales de l'Académie de médecine, il a consacré de nombreux travaux et publications à la médecine thermale et au thermalisme.

Ce livre est destiné aux médecins prescripteurs, aux étudiants de 2<sup>e</sup> cycle des études médicales, ainsi qu'aux curistes et à toutes les personnes désireuses d'être mieux informées sur la cure et les eaux thermales sulfurées de Cauterets.

1 volume 16 x 24

166 pages, 79 figures

Prix public TTC : 100 F

Franco domicile : 116 F



Expansion Scientifique Publications

#### BULLETIN DE COMMANDE

à retourner à : l'Expansion  
Scientifique  
Publications  
Service Diffusion  
15, rue Saint-Benoit  
75278 Paris Cedex 06

Nom \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

vous commande ..... ex. de « Cauterets - Station thermale des Pyrénées »  
au prix de 100 F + 16 F de frais de port

règlement joint :  chèque bancaire  chèque postal

Date : \_\_\_\_\_

Signature : \_\_\_\_\_