

La Presse Thermale et Climatique

LES EAUX THERMOMINÉRALES

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



THERMALISME AU SOLEIL ENTRE OCEAN ET MEDITERRANEE



gréoux

les-bains
en haute Provence

Rhumatismes, voies respiratoires O.R.L.
arthroses, traumatologie, arthrites.
Climat méditerranéen tempéré. Altitude 400 m.
Ouvert toute l'année.

amélie

les-bains
en Roussillon.

Voies respiratoires O.R.L. rhumatismes
Emphysème, rhino-laryngologie, pré-gérontologie.
Climat méditerranéen
Altitude 230 m.
Ouvert toute l'année.

la preste

les-bains
en haut Roussillon.

Affections génito-urinaires
lithiases, prostatisme, maladies du métabolisme, nutrition.
Altitude 1130 m.
Avril-Octobre

molitg

les-bains
en Roussillon.

Affections de la peau, voies respiratoires O.R.L.
rhumatismes, obésité, pré-gérontologie. Station-pilote de la relaxation.
Climat méditerranéen tempéré. Altitude 450 m.
Ouvert toute l'année.

barbotan

les-thermes
en Armagnac.

Station de la jambe malade
circulation veineuse, phlébite, varices.
Rhumatismes, sciaticques, traumatologie.
Station reconnue d'utilité publique.
Avril-novembre.

eugénie st christau

les-bains
Landes de Gascogne.

1^{er} Village minceur de France animé par Michel Guérard
Obésité, rhumatismes
rééducation, reins, voies digestives et urinaires.
Avril-octobre.

cambo

les-bains
en haut Béarn.

Muqueuses, dermatologie, stomatologie
Altitude 320 m.
Avril-octobre.

les-bains
en Pays basque.

Rhumatismes, voies respiratoires, O.R.L.
nutrition, obésité
Ouvert toute l'année.

demandez la documentation sur la station qui vous intéresse à :

maison du thermalisme

32 avenue de l'opéra 75002 paris. tél. 742.67.91+,
et société thermale de chaque station

stations agréées par la sécurité sociale

Les indications médicales des stations thermales françaises

Y. DENARD *

(Toulouse)

Il y a en France plus de 100 stations et plus de 1 000 sources d'où coulent des eaux de composition très variée. Cela permet sans difficulté de traiter toutes les maladies justiciables d'une thérapeutique thermale. Dans ces conditions, pour que les cures aient le maximum d'efficacité, les stations françaises ont été, autant que possible, spécialisées. Ainsi, les malades trouvent à leur disposition une concentration de moyens adaptés à leur cas, aussi bien en ce qui concerne le personnel médical et paramédical, qu'en ce qui concerne l'équipement des établissements thermaux. Il faut dire cependant que beaucoup de stations ont, à côté de leur orientation principale, une ou deux orientations secondaires.

INDICATIONS ET CONTRE-INDICATIONS GÉNÉRALES DES CURES THERMALES

Avant de parler des orientations particulières des stations françaises, il faut rappeler la place actuelle de la crénothérapie (du thermalisme) et ses limites, de façon à ce que les indications de cure soient établies à bon escient.

Précisons d'abord les limites en citant les contre-indications :

- les maladies aiguës, ou les crises aiguës de maladies chroniques,
- les cancers de toute nature,
- la tuberculose pulmonaire évolutive,
- les lésions organiques graves : insuffisance cardiaque ou rénale, cirrhose du foie.

Dès lors, les indications apparaissent nombreuses et étendues :

- convalescence des maladies aiguës ou des interventions chirurgicales pour prévenir les séquelles : hépatites, phlébites, chirurgie biliaire ou rénale, opérations ostéoarticulaires,

— maladies organiques chroniques, pour aider la guérison de lésions réversibles ou pour améliorer la tolérance de lésions constituées,

— troubles fonctionnels rebelles, quelle qu'en soit la localisation : la cure thermale constitue une thérapeutique naturelle atoxique de choix.

INDICATIONS MÉDICALES PARTICULIÈRES

Les indications de la crénothérapie couvrent pratiquement tous les chapitres de la pathologie. Nous les énumérerons en citant seulement chaque fois les principales stations concernées, la liste complète étant donnée dans le tableau.

Affections de l'appareil locomoteur

Ce sont depuis toujours l'indication principale des cures thermales. Elles drainent environ 30 p. cent des curistes. On peut les distinguer en trois groupes :

— *les rhumatismes chroniques* et tout spécialement le rhumatisme chronique dégénératif ou arthrose avec ses localisations principales : colonne vertébrale (spondylarthrose), hanches (coxarthrose), genoux (gonarthrose). Le rhumatisme inflammatoire, autrefois contre-indication, est maintenant une indication nuancée : polyarthrite ankylosante, rhumatisme psoriasique ;

— *les séquelles de traumatismes* : entorses, luxations, fractures, suites d'intervention chirurgicale ostéoarticulaire ;

— *les séquelles neurologiques*, surtout d'accidents vasculaires cérébraux (hémipariés).

On compte en France 53 stations homologuées dans cette indication, dont les eaux généralement chaudes et radioactives, sont associées aux diverses pratiques de la médecine physique.

Les stations les plus fréquentées sont : Aix-les-Bains, Dax, Gréoux, Balaruc, Ax-les-Thermes, Luchon, Amélie-les-Bains, Cauterets, Bagnères-de-Bigorre, Bourbonne-les-Bains...

* Service d'Hydrologie Thérapeutique, Faculté de Médecine, 32 allées Jules-Guesde, 31400 TOULOUSE.

Liste des stations par orientations thérapeutiques

Dermatologie

AVENE-LES-BAINS (Hérault)
LA BOURBOULE (Puy-de-Dôme)
LES FUMADES (Gard)
MOLITG-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
NEYRAC-LES-BAINS (Ardèche)
ROCHEFORT-SUR-MER (Charente-Maritime)
LA ROCHE-POSAY (Vienne)
SAIL-LES-BAINS (Loire)
SAINT-CHRISTAU (Pyrénées-Atlantiques)
SAINT-GERMAIN-LES-BAINS (Haute-Savoie)
TERCIS-LES-BAINS (Landes)
URIAGE (Isère)

Gynécologie

AIX-EN-PROVENCE (Bouches-du-Rhône)
BALARUC (Hérault)
BOURBON-L'ARCHAMBAULT (Allier)
CHALLES-LES-EAUX (Savoie)
CHATEL-GUYON (Puy-de-Dôme)
EVAUX-LES-BAINS (Creuse)
LA LECHERE-LES-BAINS (Savoie)
LUXEUIL-LES-BAINS (Haute-Saône)
SAINT-SAUVEUR (Hautes-Pyrénées)
SALIES-DE-BEARN (Pyrénées-Atlantiques)
SALIES-DU-SALAT (Haute-Garonne)
USSAT-LES-BAINS (Ariège)

Maladies cardio-artérielles

BAINS-LES-BAINS (Vosges)
BOURBON-LANCY (Saône-et-Loire)
ROYAT-CHAMALIERES (Puy-de-Dôme)

Maladies de l'appareil digestif et maladies métaboliques

ALET-LES-BAINS (Aude)
BARBAZAN (Haute-Garonne)
LE BOULOU (Pyrénées-Orientales)
BRIDES-LES-BAINS -
SALINS-LES-THERMES (Savoie)
CAPVERN-LES-BAINS (Hautes-Pyrénées)
CASTERA-VERDUZAN (Gers)
CHATEL-GUYON (Puy-de-Dôme)
CONTREXEVILLE (Vosges)
EVIAN-LES-BAINS (Haute-Savoie)
MONTROND-LES-BAINS (Loire)
PLOMBIERES (Vosges)
SANTENAY (Côte-d'Or)
THONON-LES-BAINS (Haute-Savoie)
VALS-LES-BAINS (Ardèche)
VICHY (Allier)
VITTEL (Vosges)

Maladies de l'appareil urinaire et maladies métaboliques

CAPVERN-LES-BAINS (Hautes-Pyrénées)
CHATEL-GUYON (Puy-de-Dôme)
CONTREXEVILLE (Vosges)
EUGENIE-LES-BAINS (Landes)
EVIAN-LES-BAINS (Haute-Savoie)
LA PRESTE-LES-BAINS
(Pyrénées-Orientales)
SAINT-NECTAIRE (Puy-de-Dôme)
THONON-LES-BAINS (Haute-Savoie)
VITTEL (Vosges)

Neurologie

CARBONNIERES-LES-BAINS (Rhône)
LAMALOU-LES-BAINS (Hérault)
NERIS-LES-BAINS (Allier)
USSAT-LES-BAINS (Ariège)

Phlébologie

AIX-EN-PROVENCE (Bouches-du-Rhône)
ARGELES-GAZOST (Hautes-Pyrénées)
BAGNOLES-DE-L'ORNE (Orne)
BARBOTAN (Gers)
EVAUX-LES-BAINS (Creuse)
LA LECHERE-LES-BAINS (Savoie)
LUXEUIL-LES-BAINS (Haute-Saône)
ROCHEFORT-SUR-MER
(Charente-Maritime)
SAINT-SAUVEUR (Hautes-Pyrénées)

Rhumatologie et séquelles de traumatismes ostéo-articulaires

AIX-LES-BAINS (Savoie)
AMELIE-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
AX-LES-THERMES (Ariège)
BAGNERES-DE-BIGORRE
(Hautes-Pyrénées)
BAGNOLS-LES-BAINS (Lozère)
BALARUC (Hérault)
BARBOTAN (Gers)
BAREGES (Hautes-Pyrénées)
BEAUCENS (Hautes-Pyrénées)
BOURBON-LANCY (Saône-et-Loire)
BOURBON-L'ARCHAMBAULT (Allier)
BOURBONNE-LES-BAINS (Haute-Marne)
BRIDES-LES-BAINS -
SALINS-LES-THERMES (Savoie)
CAMBO-LES-BAINS
(Pyrénées-Atlantiques)
CAMOINS-LES-BAINS (Bouches-du-Rhône)
CAPVERN-LES-BAINS (Hautes-Pyrénées)
CAUTERETS (Hautes-Pyrénées)
CHARBONNIERES-LES-BAINS (Rhône)
CHATEAUNEUF-LES-BAINS (Puy-de-Dôme)
CHAUDAS-AIGUES (Cantal)
CRANSAC (Aveyron)
DAX (Landes)
DIGNE-LES-BAINS
(Alpes-de-Haute-Provence)
LES EAUX CHAUDES
(Pyrénées-Atlantiques)
ENGHIEN-LES-BAINS (Val-d'Oise)
EUGENIE-LES-BAINS (Landes)
EVAUX-LES-BAINS (Creuse)
EVIAN-LES-BAINS (Haute-Savoie)
GREOUX-LES-BAINS
(Alpes-de-Haute-Provence)
LAMALOU-LES-BAINS (Hérault)
LA LECHERE-LES-BAINS (Savoie)
LONS-LE-SAUNIER (Jura)
LUCHON (Haute-Garonne)
LE MONT-DORE (Puy-de-Dôme)
MORSBRONN-LES-BAINS (Bas-Rhin)
NERIS-LES-BAINS (Allier)
NIEDERBRONN-LES-BAINS (Bas-Rhin)
PECHELBRONN (Bas-Rhin)
PLOMBIERES (Vosges)
PRECHACO-LES-BAINS (Landes)
RENNES-LES-BAINS (Aude)
ROCHEFORT-SUR-MER
(Charente-Maritime)
ROYAT-CHAMALIERES (Puy-de-Dôme)
ST-AMAND-LES-EAUX (Nord)
SALIES-DE-BEARN (Pyrénées-Atlantiques)
SALINS-LES-BAINS (Jura)
SAUBUSSE (Landes)

TERCIS-LES-BAINS (Landes)
THONON-LES-BAINS (Haute-Savoie)
URIAGE (Isère)
VERNET-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
VICHY (Allier)

Stomatologie

AVENE-LES-BAINS (Hérault)
LA BOURBOULE (Puy-de-Dôme)
CASTERA-VERDUZAN (Gers)
LES FUMADES (Gard)
MOLITG-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
SAIL-LES-BAINS (Loire)
SAINT-CHRISTAU (Pyrénées-Atlantiques)
SAINT-GERVAIS-LES-BAINS
(Haute-Savoie)
TERCIS-LES-BAINS (Landes)

Thérapeutique des affections psychosomatiques

BAGNERES-DE-BIGORRE
(Hautes-Pyrénées)
DIVONNE-LES-BAINS (Ain)
NERIS-LES-BAINS (Allier)
SAUJON (Charente-Maritime)
USSAT-LES-BAINS (Ariège)

Troubles de la croissance

LA BOURBOULE (Puy-de-Dôme)
LONS-LE-SAUNIER (Jura)
SALIES-DE-BEARN (Pyrénées-Atlantiques)
SALIES-DU-SALAT (Haute-Garonne)
SALINS-LES-BAINS (Jura)

Voies respiratoires

AIX-LES-BAINS - MARLIOZ (Savoie)
ALLEVARD (Isère)
AMELIE-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
ARGELES-GAZOST (Hautes-Pyrénées)
AX-LES-THERMES (Ariège)
BAGNERES-DE-BIGORRE
(Hautes-Pyrénées)
BAGNOLS-LES-BAINS (Lozère)
BAREGES (Hautes-Pyrénées)
BERTHEMONT-LES-BAINS
(Alpes-Maritimes)
BOURBONNE-LES-BAINS (Haute-Marne)
LA BOURBOULE (Puy-de-Dôme)
CAMBO-LES-BAINS
(Pyrénées-Atlantiques)
CAMOINS-LES-BAINS (Bouches-du-Rhône)
CAUTERETS (Hautes-Pyrénées)
CHALLES-LES-EAUX (Savoie)
DIGNE-LES-BAINS
(Alpes-de-Haute-Provence)
LES EAUX BONNES (Pyrénées-Atlantiques)
LES EAUX CHAUDES
(Pyrénées-Atlantiques)
ENGHIEN-LES-BAINS (Val-d'Oise)
LES FUMADES (Gard)
GREOUX-LES-BAINS
(Alpes-de-Haute-Provence)
LUCHON (Haute-Garonne)
MOLITG-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)
LE MONT-DORE (Puy-de-Dôme)
PRECHACO-LES-BAINS (Landes)
ST-AMAND-LES-EAUX (Nord)
SAINT-GERVAIS-LES-BAINS
(Haute-Savoie)
SAINT-HONORE-LES-BAINS (Nièvre)
TERCIS-LES-BAINS (Landes)
URIAGE (Isère)
VERNET-LES-BAINS (Pyrénées-Orientales)

Affections de l'appareil respiratoire

Elles représentent environ 20 p. cent des indications de cure. Elles associent les maladies otorhinolaryngologiques et broncho-pulmonaires, car il s'agit de l'atteinte d'une même muqueuse. On distingue schématiquement les infections chroniques et les allergies :

— *les infections chroniques* dépendent de la cure thermale en complément de la chimiothérapie. On peut citer : les rhinites mucopurulentes, l'ozène, les sinusites chroniques, les pharyngites mucopurulentes, les laryngites récidivantes, les otites, les bronchites chroniques ;

— *les allergies* sont dominées par l'asthme et ses équivalents.

Les stations homologuées dans les affections respiratoires sont au nombre de 31, utilisant en inhalations, humages, vaporisations ou aérosols soit les eaux sulfurées pyrénéennes, soit des bicarbonatées sodiques du Massif Central. Les principales stations sont : Luchon, Amélie-les-Bains, la Bourboule, le Mont-Dore, Cauterets, Allevard, Gréoux, Ax-les-Thermes, Bourbonne-les-Bains, Saint-Honoré-les-Bains...

Affections vasculaires

Dans ce chapitre, on distingue les maladies artérielles et les maladies veineuses.

Dans les artériopathies, l'indication principale est l'artériopathie oblitérante des membres inférieurs dans ses premiers stades évolutifs, ou plus tard à titre post-opératoire. L'insuffisance coronarienne constitue une indication plus nuancée. Il en est de même de l'hypertension artérielle.

Les maladies veineuses touchent un grand nombre de sujets. La principale indication de cure est constituée par les phlébites : soit dans la convalescence d'une phlébite aiguë, soit tardivement pour atténuer les conséquences de séquelles trophiques. Les ulcères variqueux sont une autre indication, et plus généralement les troubles trophiques distaux des membres inférieurs.

La principale station spécialisée dans les atteintes artérielles est Royat où l'on pratique des injections de gaz thermal (CO₂).

Les affections veineuses sont surtout soignées à Bagnoles-de-l'Orne, Barbotan, Aix-en-Provence, la Léchère.

Affections digestives

On groupe sous ce terme les maladies du tube digestif (estomac, duodénum, côlon) et les maladies du foie et des voies biliaires.

Maladies gastro-duodénales : les principales indications de cure sont constituées par les gastrites chroniques, les séquelles de gastrectomie, la hernie hiatale.

Maladies du côlon : les colites chroniques sont une bonne indication, en complément du traitement antimicrobien ou antiparasitaire. Les colopathies spasmodiques, si fréquentes, bénéficient également des cures. Autres indications : la constipation chronique, les dolicho et les mégacolons.

Maladies du foie : en dehors d'insuffisance hépatiques mal définies, ou de foies congestifs chez des gros mangeurs, la principale indication est la convalescence des hépatites aiguës, pour prévenir l'évolution vers l'hépatite active secondaire ou vers la cirrhose méta-ictérique tardive.

Maladies des voies biliaires : la lithiase biliaire est une bonne indication de cure, en dehors des indications chirurgicales ou à titre post-opératoire. Les dystonies biliaires, souvent accompagnées de migraines, sont une deuxième indication.

Les stations spécialisées dans ces affections sont au nombre de 16 dont les principales sont : Châtelguyon, Vichy, Capvern, Plombières, Brides-les-Bains...

Affections gynécologiques

On peut classer les indications thermales en gynécologie en quatre paragraphes :

— *Les atteintes inflammatoires chroniques* : annexites, métrites, vulvovaginites, à titre de complément du traitement classique ou au stade de séquelles.

— *Les algies pelviennes*, fréquentes et souvent mal définies.

— *La stérilité*, à titre de traitement complémentaire dans des cas bien définis.

— *Les troubles hormonaux* : on cite comme indications : retards pubertaires, syndromes préménstruels, ménopause.

On compte sur la liste 12 stations d'intérêt gynécologique. Les principales sont : Salies-de-Béarn et Salies-du-Salat, Saint-Sauveur, Luxeuil.

Affections du rein et des voies urinaires

Ce sont des indications très anciennes de la cure de diurèse. Les lithiases urinaires en dehors de l'indication chirurgicale ou à titre post-opératoire constituent la première indication, ensuite les infections urinaires, en complément du traitement antimicrobien. L'insuffisance rénale constitue une indication plus nuancée.

La liste comporte 9 stations spécialisées, dont les principales sont Capvern, Châtelguyon, la Preste...

Maladies métaboliques

Dans ces maladies, la cure de boisson peut intervenir dans certains cas en complément de mesures diététiques et éventuellement médicamenteuses. La pléthore constitue leur dénominateur commun : obésité, diabète, hyperlipidémie, hyperuricémie et goutte.

Les stations qui traitent les maladies digestives et les maladies urinaires ont également les maladies métaboliques dans leurs indications. Il faut cependant signaler l'orientation plus spéciale de Brides-Bains dans le traitement de l'obésité.

Affections dermatologiques

Nombreux sont les malades atteints d'affections dermatologiques rebelles pouvant bénéficier d'une cure thermique. L'indication principale est représentée par les eczémas, y compris en phase aiguë. Les séquelles de brûlures sont une autre indication. En stomatologie : le lichen plan et les parodontopathies.

Parmi les stations spécialisées, les principales sont : La Bourboule, La Roche Posay, Saint-Gervais, Moliyg...

Affections neuro-psychiatriques

L'hydrothérapie et la climatothérapie s'associent pour indiquer la cure dans certaines affections neuro-psychiatriques.

Le vaste domaine des névroses et de la pathologie psychosomatique constitue le terrain de choix de ce type d'indication.

Les principales stations orientées dans cette spécialité sont Nérès, Divonne et Bagnères-de-Bigorre...

Affections pédiatriques

Malgré le vieillissement de la clientèle thermique, les enfants constituent une part importante des curistes, notamment dans le domaine des affections des voies respiratoires supérieures.

Par contre, les indications générales trophiques, dominées par le rachitisme, sont en régression.

Parmi les stations, on doit citer :

- pour l'asthme infantile : La Bourboule,
- pour l'état général : Salies-de-Béarn et Salies-du-Salat.

CONCLUSION

Au terme de cette énumération à la fois trop longue et trop schématique, nous pouvons comparer les indications médicales des stations thermales françaises à un double éventail largement ouvert et dont les branches se recouvrent : nombreuses sont les indications et nombreuses sont les stations. Il appartient au médecin, dans chaque cas particulier, de faire le meilleur choix en pleine connaissance de cause pour le plus grand bien de son malade.

SEMAINE DES HOPITAUX



ÉDITÉE PAR LA SOCIÉTÉ DE
L'ASSOCIATION D'ENSEIGNEMENT MÉDICAL DES HOPITAUX DE PARIS
Organe du Collège de Médecine des Hôpitaux de Paris

LE GRAND PÉRIODIQUE DE MÉDECINE INTERNE HOSPITALIÈRE

*indispensable à l'interniste et au généraliste
pour suivre l'évolution clinique et thérapeutique
de la médecine française et étrangère*

Expansion Scientifique Française 15, rue Saint-Benoît, 75278 PARIS CEDEX 06 - Téléphone : 548.42.60+

Les circulations hydrothermales : thermalité et effet de gas-lift

J. MAISONNEUVE *
(Clermont-Ferrand)

Dans un premier temps, et ceci nous servira d'introduction, nous essaierons de situer les circuits hydrothermaux dans l'ensemble des phénomènes géologiques qui affectent la croûte terrestre, et en particulier l'hydrologie. Ceci nous amènera à rappeler quelques notions communes à l'hydrogéologie de la surface et à l'hydrogéologie profonde qu'est l'hydrothermalisme.

Puis nous développerons les facteurs spécifiques des circulations hydrothermales que sont la thermalité et l'effet de gas-lift.

Enfin, pour terminer, nous évoquerons quelques conceptions théoriques actuellement utilisées pour modéliser la circulation des eaux de la profondeur vers la surface et les conséquences qui en découlent.

L'eau dans la croûte terrestre

L'eau liquide qui recouvre la surface terrestre (mers, rivières, etc.), ou qui imprègne les terrains superficiels (nappes phréatiques ou peu profondes), imprègne aussi la croûte terrestre jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 10 à 20 km. Au-delà, d'autres fluides interviennent, tels que CO₂ ou CH₄, mais ce n'est pas le propos d'aujourd'hui.

La circulation de l'eau dans cette partie de la croûte terrestre est le domaine de l'hydrothermalisme. On peut même fixer une limite inférieure physique : celle de la température critique de l'eau en-deçà de laquelle elle est liquide ou gazeuse. Cette température est de 374 °C pour l'eau pure,

elle varie de 350 °C à 600 °C environ selon la teneur en CO₂ qui l'abaisse ou la salinité qui l'élève. La modification importante des propriétés physiques des eaux au-delà du point critique et, en particulier la diminution importante du poids spécifique, constituent un plancher pour les circulations hydrothermales en-dessous duquel les branches descendantes ne peuvent s'enfoncer. Il y a donc une coupure entre domaine hydrothermal et domaine supercritique profond. Par contre, il n'y a pas de coupure entre hydrogéologie de surface et hydrothermalisme, et ceci à commencer par l'origine même du fluide qu'est H₂O.

Je sais bien qu'il y eut une époque où l'on opposait fortement les eaux vadoses de circulation superficielle, aux eaux juvéniles hydrothermales qui, issues des magmas ou des réactions pétrogénétiques profondes, arrivaient pour la première fois à la surface de la terre. Mais actuellement on admet que l'essentiel de l'eau des circulations hydrothermales est vadose.

Certes, initialement toute l'eau de l'hydrosphère est juvénile puisque selon les théories les plus largement admises en ce moment, elle provient du dégazage des fluides du globe terrestre qui se déroule depuis le début de l'histoire de la terre, c'est-à-dire depuis 4 500 millions d'années. Et si, à ce jour, un apport de H₂O juvénile continue à se produire en provenance du manteau, celui-ci est négligeable en masse, même dans le cas de la vapeur d'eau des éruptions volcaniques ou dans le cas de l'eau qui pourrait être associée au CO₂ mantellique lors de sa remontée, puisque les deux fluides sont miscibles dans le domaine supercritique.

* Département de Géologie et Minéralogie : 5, rue Kessler, 63000 CLERMONT-FERRAND.

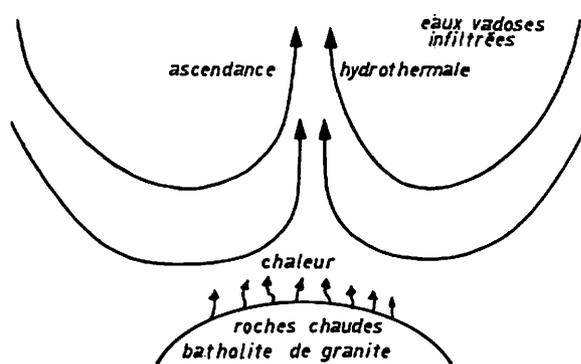


Fig. 1. — Circuit hydrothermal convectif classique.

Le circuit hydrothermal convectif

Les circulations hydrothermales constituent donc une circulation de l'eau de la surface vers la profondeur, puis de la profondeur vers la surface, dans une tranche de terrain comprise, pour la plupart, entre 0 et quelques kilomètres, disons 5 à 10 km pour fixer les idées. Nous assistons ainsi à un brassage géochimique continu dû à l'eau dans cette tranche de la croûte terrestre ; les circulations hydrothermales se présentent ainsi selon le schéma-type du circuit hydrothermal convectif (fig. 1).

On imagine bien un tel schéma au-dessus d'une masse de roche chaude, mais ce schéma, sans être aussi typé, intervient dans un grand nombre d'autres cas comme, par exemple, la contribution hydrothermale à la drainage dans un bassin sédimentaire, par des eaux chaudes issues du socle.

Le schéma du circuit hydrothermal convectif est valable pour les sources hydrothermales que nous connaissons bien à la surface des continents, mais aussi dans le cas des émanations hydrothermales que l'on a découvertes au fond des rides médio-océaniques [19, 14].

Le gradient hydraulique

Si donc les circulations hydrothermales appartiennent à l'hydrogéologie, le gradient hydraulique — agent normal de l'hydrodynamique — intervient plus ou moins et même, le plus souvent, reste le facteur prédominant (massif montagneux, par exemple). Nous ne le développerons pas ici ; la bibliographie sur ce point est abondante et surtout ce facteur n'est pas spécifique des circulations hydrothermales.

De la même manière, les notions de porosité et de perméabilité sont aussi nécessaires pour com-

prendre les circulations hydrothermales que les circulations de surface. En précisant que par suite de la compaction, la porosité tend à diminuer avec la profondeur et peut devenir très faible (souvent inférieure à 1% dans les roches cristallines). La perméabilité diminue aussi : la perméabilité d'interstices disparaît progressivement et il ne subsiste que la perméabilité de fractures. La perméabilité d'une masse granitique en profondeur est souvent de l'ordre de 10^{-3} md $\# 10^{-11}$ m/s [34], c'est-à-dire comparable à celle d'une argile de surface. On estime qu'un flux notable ne peut s'établir que si la perméabilité est d'au moins 0,1 md $\# 10^{-9}$ m/s [15, 25]. Ces valeurs de perméabilité s'entendent comme valeur moyenne d'un grand volume de roches.

La circulation à grande distance et l'émergence à la surface sont donc conditionnées par l'importance des fractures profondes et leur extension régionale. C'est pourquoi il est toujours important de connaître la tectonique régionale pour comprendre les circulations hydrothermales.

L'âge des eaux

Ceci nous amène à parler des vitesses de circulation des eaux thermales minérales, elles sont souvent très faibles ; c'est-à-dire que l'âge des eaux minérales a pu, dans quelques cas, être estimé en milliers d'années, voire beaucoup plus. Et sans en faire une règle systématique on peut dire que les eaux les plus profondes, circulent le moins vite et sont les plus vieilles.

Les gîtes minéraux hydrothermaux

D'autre part, les circulations hydrothermales n'ont pas seulement pour effet de donner naissance à la surface à des sources chaudes plus ou moins minéralisées, mais encore, grâce au brassage, associé à une mise en solution des éléments, elles les transportent sur plusieurs kilomètres de croûte terrestre et les précipitent ; elles peuvent former ainsi, dans des circonstances favorables, des concentrations minérales ayant un intérêt économique. Beaucoup de minéraux utiles (Pb, Zn, Cu, Ag...) sont actuellement exploités dans des filons déposés aux temps géologiques antérieurs par une circulation hydrothermale. Actuellement, sous nos pieds, les circulations hydrothermales transportent, concentrent et déposent des filons minéralisés. Ils sont hors de portée de notre atteinte pour être exploités, mais il convient de ne pas oublier ceci dans le comportement d'un circuit hydrothermal. Ainsi, par suite des processus de dépôts conduisant à l'incrustation de la fissure, une fissure hydrothermale a, dans le temps, une durée de fonctionnement limitée si elle n'est pas réouverte par d'autres facteurs géologiques tectoniques. Elle tend toujours à s'obstruer, au bout d'un laps de temps plus ou moins long.

THERMALITÉ

Le thermosiphon : machine thermique

Le caractère le plus marquant des eaux thermales est donc, comme leur nom l'indique, d'être chaudes, c'est-à-dire d'avoir une température bien supérieure à la température moyenne des sources et nappes superficielles ; cela peut aller jusqu'à l'ébullition.

Cette chaleur est le facteur énergétique le plus caractéristique de la remontée des eaux thermales. C'est le principe du thermosiphon, parfois appelé thermo-lift pour faire pendant au terme de gas-lift. Quand on parle de thermosiphon, de quoi s'agit-il ?

La densité de l'eau diminue lorsque sa température s'élève [26] :

	40° C	60° C	100° C	150° C	200° C
Densité de l'eau pure (liquide)	0,992	0,983	0,958	0,917	0,863

Ces valeurs s'entendent à une pression telle que l'eau reste à l'état liquide.

L'eau réchauffée en profondeur tend à remonter à la surface. Cet allègement dû à l'élévation de la température est peu modifié par l'augmentation de la pression due à la profondeur, car l'eau est assez peu compressible. Signalons aussi que l'élévation de la température diminue la viscosité d'environ 5 fois entre 20°C et 150°C, ce qui facilite la circulation, surtout si l'on tient compte des faibles perméabilités en profondeur.

Donc si l'eau froide s'enfonce, se réchauffe, puis tend à remonter, nous avons apparition du circuit hydrothermal convectif, c'est le thermosiphon.

Celui-ci est une machine thermique qui, comme toute machine thermique est soumise au principe de Carnot ; il nous indique le rendement maximum théorique d'une machine thermique :

$$R = 1 - \frac{T_2 \text{ (temp. en K de la source froide)}}{T_1 \text{ (temp. en K de la source chaude)}}$$

R est la part d'énergie thermique qui peut, au mieux, être transformée en travail mécanique. Celui-ci est médiocre comme dans toutes les machines thermiques. Le travail mécanique est celui de la remontée de l'eau. L'énergie fournie est l'énergie calorifique qui se refroidit en remontant. Ceci implique une perte de chaleur dans l'encaissant, quel que soit le processus de perte de chaleur (conduction, convection dans des micro-fissures) et engendre une zone de flux de chaleur diffus dans la zone environnant la veine hydrothermale.

On citera, par exemple, le refroidissement d'une eau chaude par conduction dans les terrains encaissants lors de sa remontée [33], ainsi que la méthode de recherche des sources, en mesurant la température des roches (Cauterets, Hautes-Pyrénées).

La répartition des isothermes mise en évidence dans la région de Baku, autour de certaines zones ascendantes d'eaux et d'hydrocarbures, est un autre exemple assez remarquable [31].

Puisque le travail produit est celui de la remontée de l'eau, il est de l'ordre de 1 dN . 1 000 m = 10 000 J/kg d'eau remontée d'1 km.

Considérons, par exemple, le cas d'un aquifère à 150°C (ou 423 K) situé à 5 km (valeur moyenne courante, avec un gradient de 30°C/km), supposons que la température d'émergence thermique soit de 60°C (ou 333 K). Au cours de la remontée $\Delta T = 150^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C} = 90^\circ\text{C}$

$$\Delta Q = 378\,000 \text{ J ou } 90\,000 \text{ cal}$$

l'émergence joue le rôle de source froide, l'aquifère de source chaude.

Le rendement théorique maximum est de

$$1 - \frac{333}{423} = 22 \text{ p. cent.}$$

Le travail fourni est de 50 000 J et le rendement

$$\text{pratique est de } \frac{50\,000}{378\,000} = 13 \text{ p. cent.}$$

Il y a donc dans cet exemple environ 328 000 J/kg (ou 78 000 cal/kg) nécessairement dispersés dans l'encaissant, selon le principe de Carnot. Ces calories créent une zone chaude autour de chaque circuit hydrothermal ascendant, qui se comporte comme un tuyau de chauffage central. Nous reviendrons sur cette comparaison.

Eaux pures et eaux salées

Dans ce premier calcul simplifié, nous avons considéré que l'eau était pure, mais dans le sous-sol les eaux sont toujours plus ou moins minéralisées, c'est-à-dire, salées ; or les eaux salées sont plus denses, elles tendent donc à s'enfoncer (tableau I).

La dissolution de CO₂, au contraire, entraîne un allègement. L'augmentation de la densité, liée à la salinité, implique que seules les eaux peu ou modestement salées peuvent être aisément remontées par le seul processus de thermosiphon. Dans certains cas, l'augmentation de densité due à la sali-

TABLEAU I
Eaux pures et eaux salées, exemple à 20 °C

Densité de l'eau	Pour une teneur en NaCl	Pour une teneur en CO ₂ N ₂
1,007	10 g/l	6 g/l
1,014	20 g/l	13 g/l

TABLEAU II

Eaux pures et eaux salées à Vichy et Bourbonne-les-Bains

	Minéralisation	Densité à temp. ambiante	Rappel : densité de l'eau pure
Vichy (plusieurs sources)	5 à 6 g/l	1,005 à 1,006	à 40° C 0,992
Bourbonne-les-Bains	7 g/l	1,006	à 60° C 0,983

nité est trop importante par rapport à l'allègement dû à la thermalité : ces eaux salées n'émergeraient pas si d'autres processus (artésianisme dû au gradient hydraulique, effet de gas-lift...) n'intervenaient pas en plus.

Souvent les eaux des émergences spontanées ont des densités légèrement inférieures à celles des nappes superficielles environnantes. Ceci montre que leur densité accrue par la minéralisation est compensée par l'élévation de la température, juste ce qu'il faut pour leur permettre d'émerger (tableau II).

Ces deux exemples ne sont pas en réalité aussi simples car, à Vichy, l'effet de gas-lift s'ajoute et à Bourbonne, les aquifères superficiels sont légèrement minéralisés.

Nous retiendrons de tout ceci que, pour une température donnée, il y a une salinité maximale susceptible d'être remontée.

Principe de l'ingénieur François et effet topographique

Une des conséquences importantes de la différence de densité des eaux froides et chaudes a été utilisée au siècle dernier par l'ingénieur François dans un grand nombre de captages ; en particulier à Ussat (Ariège), il a utilisé les eaux froides de l'Ariège pour améliorer le débit de la source. Ce principe a été utilisé ici même, à Luchon (Canal François).

Le principe consiste à utiliser la contre-pression créée par les eaux superficielles plus froides, donc plus denses, pour éviter la dispersion dans les couches superficielles et focaliser ainsi les remontées hydrothermales autour de la zone d'émergences (fig. 2). En réglant judicieusement la hauteur de l'eau froide, on peut arriver à obtenir le niveau et le débit optimum de la source à capter.

Ce principe permet d'expliquer certaines particularités apparemment paradoxales. Par exemple, le débit d'un grand nombre de sources thermales s'élève après une période de pluie. Dans certains

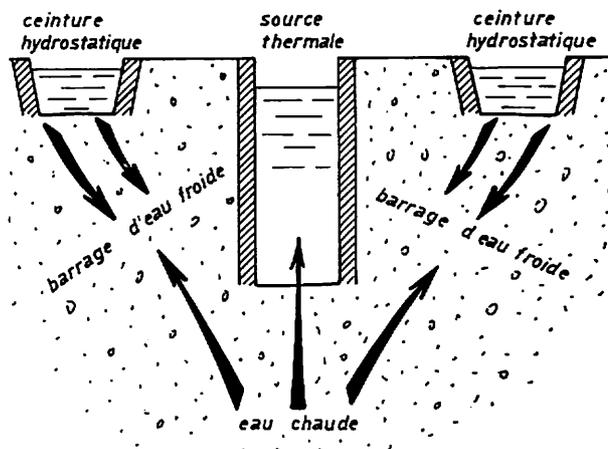


Fig. 2. — Principe du captage par contre-pression hydrostatique de François [24].

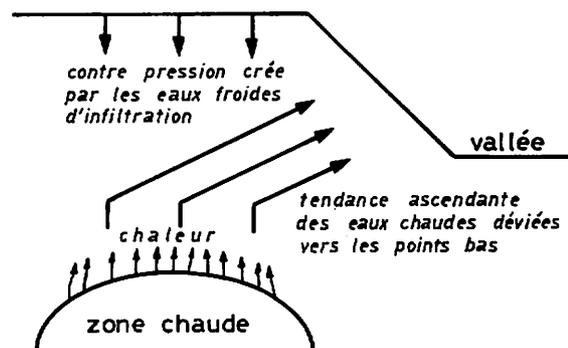


Fig. 3. — Principe de l'effet topographique.

cas il y a simple mélange avec les eaux superficielles, ce qui se traduit par une baisse de minéralisation. Mais, parfois, la minéralisation reste constante. Ceci est tout simplement l'expression d'une contre-pression hydrostatique accrue qui focalise davantage les eaux thermales vers le captage. Ainsi J.-P. Destombes [13] cite dans le bassin de Vals (Ardèche), des sources dont la résistivité varie avec les précipitations, mais d'autres dont la relation est inverse ; et M. Jantin [18] constate sur l'émergence principale une concentration des gaz avec débit gazeux plus fort au printemps, sous l'influence des eaux superficielles d'hiver.

A l'échelle régionale, ceci donne naissance à l'effet topographique, dont une manifestation triviale est que les eaux thermales n'affleurent que dans le fond des vallées et non sur le flanc des montagnes. Soit une source de chaleur profonde engendrant un circuit hydrothermal convectif, si celle-ci se trouve sous une zone haute (montagne, horst...), le flux hydrothermal ascendant sera dévié vers les zones basses (vallées) par la contre-pression hydrostatique des eaux superficielles infiltrées dans la zone montagneuse (fig. 3).

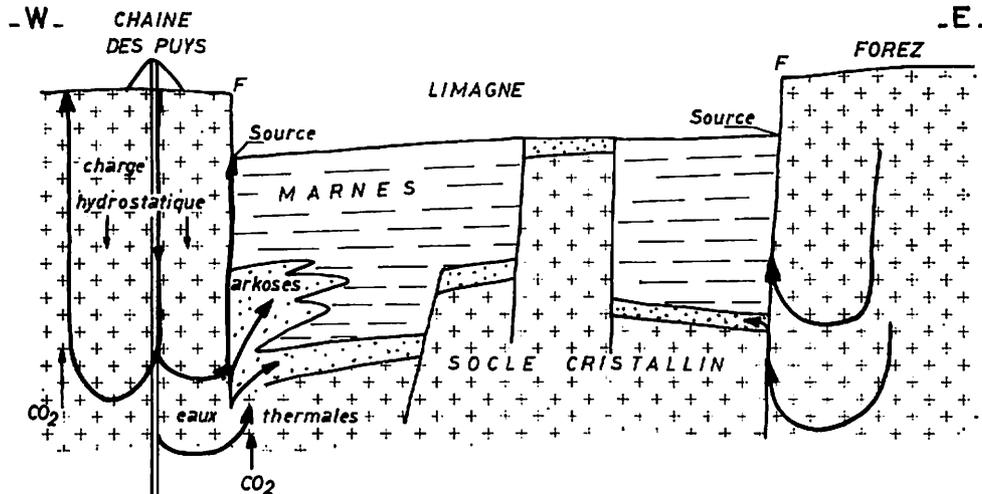


Fig. 4. — Circulation hydrothermales en Limagne.

Dans le cas d'une structure en horst et graben, on constate que les eaux chaudes sont rabattues :

- vers les failles, et alors elles émergent,
- vers les niveaux perméables des sédiments occupant les grabens.

On aboutit ainsi à une concentration des eaux chaudes vers les bassins sédimentaires ; ceci peut se traduire par des gradients géothermiques, plus élevés, au moins sous les écrans imperméables phylliteux (fig. 4) ou par une contribution hydrothermale aux phénomènes de drainage. Ainsi la Limagne est un graben rempli de sédiments tertiaires, formés de marnes et d'arkoses ; elle est entourée de deux horsts cristallins : celui de la Chaîne des Puy's à l'Ouest, et celui du Forez à l'Est. Un volcanisme alcalin d'origine mantellique et d'âge tertiaire et quaternaire subséquent a utilisé les fractures profondes pour se mettre en place ; ces fractures permettent aussi le cheminement des eaux et des gaz. La charge hydrostatique créée par les zones hautes des horsts, favorise l'écoulement des eaux thermales vers la plaine de la Limagne où elles émergent le long des failles, ou s'accroissent dans les niveaux sédimentaires. Il est vrai que cet exemple est plus complexe car le CO_2 , par effet de gas-lift (voir ci-dessous) contribue aux circulations et donne même quelques remontées d'eaux minérales froides (Ceyssat, Puy-de-Dôme) dans le horst de la Chaîne des Puy's où il y a donc aussi, non seulement des branches descendantes, mais quelques branches ascendantes.

La courbe d'ébullition de l'eau

Si on chauffe l'eau à une certaine température (100°C au niveau de la mer) il y a ébullition, c'est-à-dire passage de la phase liquide à la phase

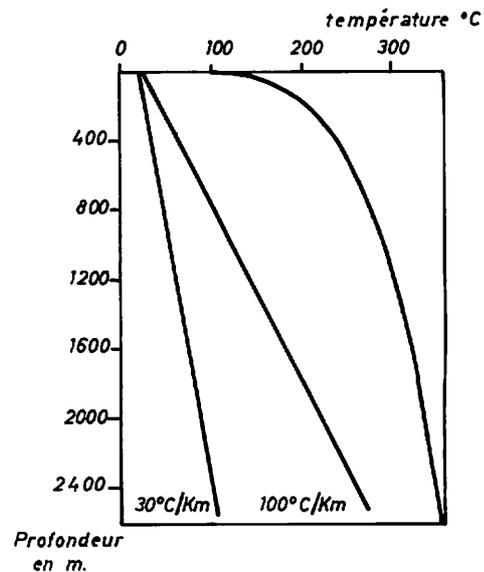


Fig. 5. — Courbe d'ébullition de l'eau.

vapeur. La température d'ébullition varie avec la pression. On peut donc tracer la courbe d'ébullition de l'eau en fonction de la profondeur. Cette courbe est légèrement déplacée vers le bas s'il y a du CO_2 , c'est-à-dire que l'ébullition se produit à une température plus basse pour une profondeur donnée (fig. 5).

En reportant sur cette courbe la droite des températures en profondeur, pour divers gradients géothermiques, et notamment dans le cas d'un gradient géothermique moyen $30^\circ\text{C}/\text{km}$, on voit que d'ordinaire l'eau profonde reste dans le domaine de la phase liquide, on est bien en-deçà de la courbe d'ébullition.

Mais dans certains cas, tel celui d'un gradient géothermique élevé dû à une masse magmatique située à quelques kilomètres de profondeur, on peut atteindre l'ébullition, c'est-à-dire que la remontée de l'eau se fera en suivant la courbe d'ébullition. Ce sera le cas des champs géothermiques, haute température avec, en surface, des dégagements de vapeur ou des éruptions de geysers. Cependant la recondensation peut se faire avant la surface donnant des sources d'eaux très chaudes. Ces systèmes à dominante vapeur nécessitent, non seulement un gradient géothermique localement élevé, mais d'autres conditions géologiques (entre autres un subtil équilibre entre évaporation et alimentation que nous ne développerons pas).

Nous attirerons seulement l'attention sur le fait que s'il y a ébullition, c'est-à-dire transition de phase avec une phase vapeur et une phase liquide, ceci implique des fractionnements et séparation chimique souvent notables, donc des conséquences importantes sur le chimisme des eaux.

Origine de la chaleur : chaleur radioactive et magmatique

Mais d'abord quelle est l'origine de cette chaleur ?

C'est le flux géothermique ou chaleur fournie par la terre ; le flux géothermique est de l'ordre de 50 à 60 mW/m² mais, dans certaines régions comme le Massif Central français, il présente des valeurs anormales plus élevées, de l'ordre de 80 à 100 mW/m². Nous verrons plus loin comment ces anomalies sont une conséquence des circulations hydrothermales.

Il faut distinguer le cas général et celui des champs géothermiques à haute température.

— Dans le cas général la chaleur géothermique vient, pour une grande part (environ les 2/3) des 15 à 20 premiers kilomètres de la croûte granitique. Le tiers restant vient de plus profond, c'est-à-dire du manteau. Ce flux mantellique (dit résiduel) est estimé à 20-30 mW/m² (valeurs extrêmes 17-33 mW/m²). Nous ne parlerons pas de l'origine de cette chaleur mantellique. La chaleur de la croûte granitique provient des éléments radioactifs qu'elle contient tels que :



Ainsi: 1 ppm d'U (235 et 238) correspond à 0,73 $\mu\text{cal/g/an}$

1 ppm de Th (232) correspond à 0,2 $\mu\text{cal/g/an}$
1 p. cent de K correspond à 0,7 $\mu\text{cal/g/an}$.

C'est ainsi qu'une granodiorite qui contient couramment de l'ordre de :

U	Th	K
6 à 8 ppm	10 ppm	3,5 ‰

donne 8 à 10 $\mu\text{cal/g/an}$

ou un leucogranite qui contient :

U	Th	K
15 ppm	8 ppm	3,5 ‰

donne 15 à 20 $\mu\text{cal/g/an}$.

Ces valeurs sont calculées à partir des teneurs en U d'échantillons prélevés près de la surface [23]. Or, dans la tranche des 100 à 200 premiers mètres, il y a souvent une perte d'U [27], ce qui implique que ces valeurs sont un minimum.

D'autres roches sont riches en Th (comme certains gneiss à monazite) et peuvent donner des valeurs comparables.

Pour illustrer cette production de chaleur, une tranche de 5 km de croûte granitique et un m² de section contribue pour :

$$\frac{5\,000 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2 \times 2,7 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3 \times 10 \cdot 10^{-6} \times 4,18}{360 \text{ j.} \times 86\,400} = 18 \text{ mW/m}^2$$

en prenant une densité moyenne de 2,7 10^6 g/m^3 de granite, soit environ 20 à 30 p. cent du flux géothermique moyen.

Cependant la production instantanée de chaleur reste, somme toute assez faible, pour obtenir des températures de l'ordre de 150 - 200 °C comme nous l'indique couramment les géothermomètres.

Pour donner une autre comparaison, un magma granitique, en se refroidissant de 700 °C à 200 °C libère environ 200 cal/g (y compris la chaleur latente de cristallisation) mais par radioactivité un granite produit, la même quantité de chaleur mais en 20 MA. Ceci implique une accumulation de la chaleur radioactive.

Ainsi les circulations hydrothermales drainent une chaleur stockée pendant des centaines de milliers ou même des millions d'années. La condition d'accumulation et de stockage préalable est indispensable. Ceci implique aussi une durée de vie limitée pour un circuit hydrothermal donné qui s'arrêtera lorsqu'il aura épuisé la chaleur d'un volume de roches.

Le transport de la chaleur : conduction et convection

Passons maintenant au transport de cette chaleur. On sait qu'il existe deux processus de transport de la chaleur (trois avec la radiation, mais elle n'intervient pas dans ce domaine) :

— la conduction : propagation de chaleur à travers une paroi solide, sans transport de matière

— la convection : la chaleur est transportée par un fluide caloporteur, l'eau ; cette dernière convient particulièrement bien, grâce à sa chaleur spécifique anormalement élevée. Celle-ci est 5 fois plus

élevée que celle d'un grand nombre de minéraux des roches ; elle croît avec la température :

	Eau liquide (cal/g° C)	Quartz
40 °C	1	0,18
200 °C	1,06	0,25

Pour comparer les rôles respectifs de la convection et de la conduction, nous prendrons comme exemple le chauffage central.

Dans un immeuble ayant une chaudière puissante à la cave, pour chauffer les étages, il faut ouvrir les robinets pour permettre à l'eau de circuler dans les tuyaux et d'apporter ainsi aux étages la chaleur produite au sous-sol. C'est le transport par convection.

Tandis que, si on ferme les robinets, et si on attend la chaleur qui se propage par conduction dans les murs, on risque d'attendre le retour du printemps sans jamais avoir connu une ambiance tiède.

Cet exemple est un peu caricatural, mais il montre que seul le transport par convection est efficace et surtout rapide. Certes la conduction intervient dans le flux géothermique de base car, au fil des M.A., le flux géothermique finit par atteindre un régime d'écoulement stationnaire du manteau jusqu'à la surface mais, chaque fois qu'il y a une anomalie, il faut chercher à l'expliquer par la convection des fluides ; et c'est la convection par l'eau qui joue le rôle essentiel, car l'eau circule facilement à travers les milieux solides s'ils sont tant soit peu fissurés ou poreux, c'est-à-dire perméables. Accessoirement peut se surajouter un « effet de horst ». Une remontée de horst de un km en un M.A. (vitesse vraisemblable, bien qu'assez importante). Avec une température supérieure d'environ 30 °C, cet excès thermique a tendance à être lessivé vers les grabens voisins et pour une couche de roches granitiques de 5 km environ, correspond à un flux moyen supplémentaire de 5 à 10 mW/m², ce qui reste modeste.

Dans l'autre cas, celui des champs géothermiques haute température et celui de l'hydrothermalisme des rides médio-océaniques, la chaleur vient du manteau et le fluide caloporteur est un magma en fusion ; celui-ci n'arrive pas toujours jusqu'à la surface et forme une chambre magmatique à quelques kilomètres de profondeur. Alors l'eau prend encore le relais dans le transport de la chaleur (en phase liquide et en phase vapeur).

De toutes manières, ce sont donc les facteurs structuraux qui règlent les circulations hydrothermales en les facilitant (fracturation, perméabilité...), ou, au contraire, en s'y opposant (écran thermique phylliteux...) et qui déterminent la répartition des anomalies de flux géothermique, qui ont pour origine ces circulations.

EFFET DE GAS-LIFT

Solubilité du CO₂

L'effet de gas-lift n'intervient pas toujours dans la circulation des eaux thermo-minérales, mais seulement dans le cas des eaux carbo-gazeuses. Si le gaz carbonique joue un rôle important, c'est parce que sa solubilité dans l'eau est incomparablement plus importante que celle des autres gaz [32].

α dans les conditions standard

CO ₂	N ₂
0,872	0,0154

α est le coefficient de solubilité des gaz dans l'eau pure, comme l'exprime la formule :

$V = \alpha C.P.$ où C est la concentration et P, la pression totale.

Comme pour tous les gaz, la solubilité croît avec la pression. Avec la température, la solubilité de CO₂ décroît, d'abord jusqu'à 130 °C environ, puis elle recommence à croître ensuite, comme le montre bien la courbe de variation du coefficient K de la loi de Henry, en fonction de la température (fig. 6). Les valeurs élevées de ce coefficient correspondent à de faibles valeurs de solubilité.

Origine du CO₂

Evoquons d'abord l'origine du CO₂ dans le cas des liquides carbogazeux bien connus comme la bière ou le champagne, c'est le produit de la fer-

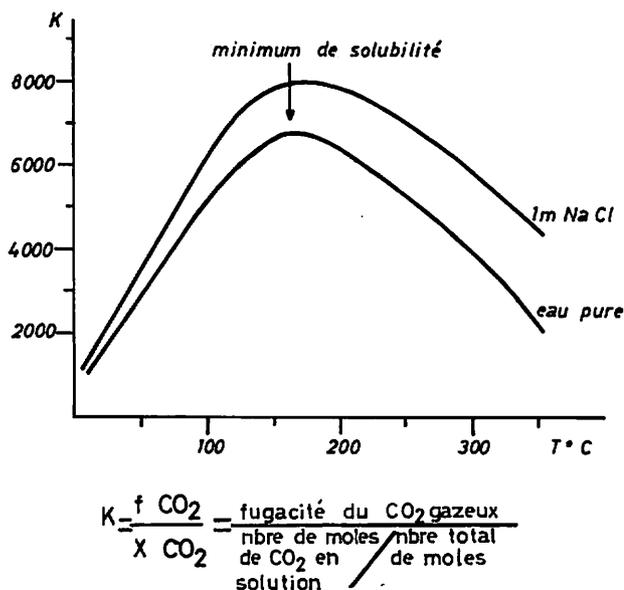


Fig. 6. — Valeurs de la constante K de la loi Henry pour la dissolution du CO₂ dans l'eau (d'après Ellis and Golding, Am. J. Sci., 1963, 261, 4760, et H.L. Barnes [6]).

mentation organique. Dans le cas des eaux minérales, le CO_2 d'origine organique peut intervenir, mais sa part reste faible ; c'est le CO_2 infracrustale ou mantellique qui est prédominant, surtout lorsqu'il y a un dégagement important, c'est-à-dire plusieurs centaines de centimètres cubes au moins, et couramment un à deux litres de CO_2 /litre d'eau mesuré sous les conditions standard. C'est le même processus de dégazage qui, par les grandes fractures de l'écorce terrestre, se produit depuis le début de l'histoire de la terre. On peut ajouter, dans certains cas, la décomposition thermique des carbonates lorsque la pression n'est pas trop élevée (chambres magmatiques à faible profondeur, par exemple).

En France, le CO_2 mantellique est très abondant dans le Massif Central, la Vallée du Rhône et le Languedoc.

Effet de gas-lift

Qu'est-ce donc que l'effet de gas-lift ?

Lorsque vous ouvrez une bouteille d'eau gazeuse ou une bouteille de champagne, la baisse de pression entraîne le dégagement du gaz dissous, ce qui donne naissance à une émulsion, la mousse, qui allège le liquide et facilite sa remontée : c'est l'effet « Pschitt » de l'eau Perrier, ou encore l'effet Champagne.

Dans tous les cas : eau Perrier, Champagne, Bière, il s'agit du gaz carbonique en excès dissous dans l'eau sous forme de HCO_3^- et CO_2H_2 ; c'est-à-dire qu'il n'est pas totalement équilibré chimiquement par des cations.

Ajoutons que l'effet de gas-lift, comme le pompage à l'air-lift, entraîne un refroidissement de l'eau ; mais nous n'avons pas connaissance de mesures précises effectuées dans ce domaine.

L'allègement produit, c'est-à-dire la densité de l'émulsion, est évidemment fonction de la proportion de CO_2 dissous. Dans le cas de Châtel-Guyon (Puy-de-Dôme) où l'eau contient environ 1,5 litre de CO_2 /litre d'eau, soit 7.10^{-2} mole, L. Armand [3] a mesuré la densité de l'émulsion :

à 22 m de la surface	1
(pas de démixion)	
à 15 m de la surface	0,4
à 5 m de la surface	0,2

On voit donc, dans cet exemple, que le poids de la colonne d'eau est allégé considérablement dans les 20 derniers mètres, ce qui favorise bien évidemment l'émergence.

L'allègement dû au CO_2 est nécessaire à l'émergence d'un certain nombre de sources tièdes et, à plus forte raison, froides et fortement minéralisées ; c'est-à-dire que, compte tenu de leur densité, elles ne pourraient pas émerger par le seul effet de ther-

malité : par exemple Ceysnat (Puy-de-Dôme) assez haut placé sur le horst de la chaîne des Puys, a une température de 12°C et une minéralisation de 4,7 g/litre ; de même certaines sources de la vallée du Rhône, comme Condillac, où $T = 11^\circ\text{C}$ et 2,2 g/litre de minéralisation. Dans le cas des eaux du bassin de Vals, l'effet de gas-lift n'est pas le seul à intervenir, la pression hydrostatique des massifs montagneux environnants joue un rôle complémentaire [13].

Comme le CO_2 est soluble sous pression, il est véhiculé dans les aquifères par les eaux à l'état dissous. Il ne demande qu'à se dégager lors d'une baisse de pression, ce sera le cas à l'émergence. Ce sera aussi le cas lorsqu'un forage rencontre un aquifère d'eau riche en CO_2 et le met en communication avec la surface. On assiste alors à un dégagement éruptif avec formation de geyser de CO_2 [Martres-d'Artières (Puy-de-Dôme). Montrond-les-Bains (Loire), etc.].

Parfois ce dégagement spontané ne se produit pas immédiatement. Le CO_2 se maintient en sur-saturation à l'état dissous, cet état est métastable ; ceci arrive notamment dans le cas des faibles débits. C'est toute la différence entre la bouteille de champagne ouverte avec précaution, et celle que l'on agite avant d'ouvrir, et avec laquelle on asperge tous les convives.

Pour provoquer le dégazage et pour réamorcer une émergence captée, A. Aubignat et L. Armand utilisent un tube siphonide composé de tubes de diamètres différents allant en croissant vers le bas, ou un tube tronconique dont le plus grand orifice est tourné vers le bas ; ce dispositif permet la dé-compression de l'eau chargée de CO_2 et la formation d'émulsion.

Un autre cas intéressant est celui des sources intermittentes ou geysers de CO_2 (fig. 7) [12, 28] : la fissure hydrothermale se remplit d'eau sursaturée en CO_2 , c'est-à-dire peu dégazée, si cette sur-saturation atteint un niveau critique, la formation de bulles se propage alors de proche en proche et entraîne un dégagement éruptif qui vide la fissure,

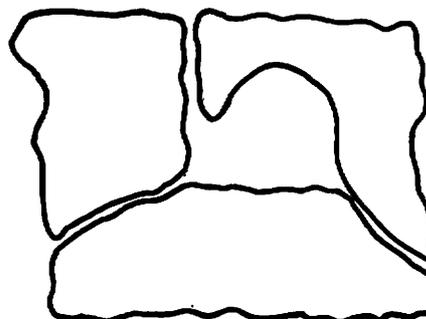


Fig. 7. — Schéma de principe d'un geyser (d'après J.S. Rinehart [28]).

puis le cycle recommence. Dans l'explication du phénomène des sources intermittentes, le circuit souterrain présente une structure caverneuse, avec poches et anfractuosités. Le gaz carbonique s'accumule dans ces poches jusqu'à ce qu'il atteigne une telle pression qu'il entraîne l'eau, favorisant le dégazage brutal et la vidange de la fissure.

Un autre fait à souligner est que le dégagement spontanée de CO₂ est sensible aux variations de pression atmosphérique, une baisse de celle-ci entraîne un accroissement du dégagement du gaz spontané, c'est-à-dire une augmentation de débit de la source [24].

A Hauterive (Allier), L. Armand [3] a mesuré :

Pression barométrique de mercure	718 mm	740 mm	756 mm
Débit en litre/mn	12,3	10,4	8,9

M. Jantin [18] constate que, pour quelques sources du bassin de Vals (Ardèche) une variation de pression atmosphérique de 20 millimètres de mercure (# 30 mb) entraîne une modification dans le débit de 20 à 30 p. cent.

Démixion dans la fissure hydrothermale

La démixion est une transition de phase avec une phase gazeuse (CO₂) et une phase liquide (eau + acide carbonique + bicarbonates). Cette séparation de phase s'accompagne toujours de fractionnement ou séparation chimique, c'est-à-dire souvent d'un dépôt de minéraux. On connaît le dépôt classique des travertins ou des oxydes de fer à l'émergence ; ceci peut se produire en profondeur dans la fissure hydrothermale associée à toute une gamme de précipités minéraux ; ce phénomène est courant dans la genèse des gîtes minéraux. Il contribue, de plus, à obturer la fissure hydrothermale.

La courbe du coefficient de la loi de Henry montre un minimum de solubilité du CO₂ vers 130 °C - 140 °C ; ceci explique qu'un nombre important de dépôts hydrothermaux liés à la démixion de CO₂ se soient formés dans cette fourchette de température. Nous citerons ainsi l'exemple de l'uranium, transporté par les eaux riches en CO₂ sous forme d'Uranyle di- ou tricarbonates. On a pu déterminer que certains gîtes d'uranium s'étaient formés entre 100 et 150 °C. On peut encore citer un grand nombre de gangues carbonatées hydrothermales.

MODÈLES D'ASCENDANCE DES EAUX THERMALES ET PROPRIÉTÉS DES EAUX

Après avoir exposé les trois principaux facteurs qui interviennent ou peuvent intervenir comme moteur de circulations hydrothermales, nous allons

distinguer trois types de concepts théoriques utilisés pour modéliser la remontée des eaux thermales :

- l'ascendance « métastable »
- l'ascendance « avec évolution »
- l'ascendance avec « influence du drainage hydro-dynamique ».

Ces trois modèles sont théoriques, c'est-à-dire que, dans la réalité ils jouent un rôle plus ou moins grand, selon le cas. Les deux premiers sont à court terme indépendants du temps en un point d'émergence ou de captage donné. Ils supposent un volume d'eau qui garde son « identité ». Le troisième, au contraire, fluctue à court terme. Il implique un mélange d'eaux.

Ascendance métastable

Dans le cas d'ascendance « métastable », on admet que l'eau remonte à la surface sans que sa composition chimique varie, ou tout au moins, qu'elle varie assez peu pour que la composition analysée à l'émergence (ou reconstituée en ajoutant les gaz de dégagement spontané), soit celle de l'aquifère profond. Les seules modifications prises en considération sont les changements de température et de pression. L'état « métastable » est postulé dans les modèles de géothermomètres.

Ascendance avec évolution

Dans le deuxième modèle, au contraire, on considère qu'il y a évolution progressive de la composition des propriétés de l'eau thermale lors de sa remontée ; cette évolution est liée à la baisse de température et à la baisse de pression. Ceci entraîne, par exemple, la précipitation des minéraux dans la fissure thermale (telle que la silicification due au refroidissement, etc.). C'est dans ce processus que s'intègrent tous les modèles de formation des gîtes minéraux. Ces deux modèles sont, à court terme, indépendants du temps car on suppose que, en un point donné du circuit (émergence ou autres), pour une période de temps bien supérieure à celui des observations humaines, on a affaire à un régime stationnaire de débit, de pression, et de température.

Ascendance avec influence du drainage hydro-dynamique

Dans le troisième modèle, au contraire, les propriétés des eaux varient à court terme, en fonction de la dynamique du circuit hydrothermal. Si celui-ci, par une augmentation de débit, intéresse des zones de plus en plus profondes, ceci implique des mélanges d'eaux aquifères différents se traduisant à l'émergence par des modifications de propriétés.

Expliquons nous à l'aide d'exemple en prenant le cas de grands bassins sédimentaires [32] ou de fosses volcano-tectoniques remplies de tufs. Dans ceux-ci les eaux sont stratifiées. Les plus salées se trouvent à la base et circulent très peu et très lentement. Les émergences spontanées de surface, lorsqu'elles existent, sont moins minéralisées. Elles ne représentent que la composition de la tranche d'eau la moins profonde, elles peuvent être qualifiées d'« émergences de débordement ».

Un forage atteindra, selon la profondeur, des niveaux plus ou moins minéralisés et rabattra ou mélangera des eaux différentes en fonction du débit exploité. Citons comme exemple : Salins dans le Jura, où les sources spontanées ont une minéralisation de 12 g/litre et celles obtenues par pompage, 250 à 300 g/litre ; citons encore l'étagement de la minéralisation dans le bassin de Vals suggéré par J. Goguel et J.-P. Destombes [16, 13].

Un phénomène naturel comme le thermosiphon ou le gas-lift peut remonter des eaux profondes minéralisées, mais pour une température donnée il y a une salinité maximum susceptible d'être remontée. Toute modification qui entraîne des modifications de débit, entraîne des variations de propriétés chimiques avec mélange d'eaux de niveaux différents.

Autrement dit, la composition d'une eau dépend, non seulement de la nature de l'aquifère, mais des

caractéristiques de la circulation, et elles peuvent varier avec le temps à court terme.

Nous pouvons reprendre l'exemple cité plus haut du bassin de Vals où, dans un même contexte granitique, la diversité des régimes de drainage est responsable des différences de composition [18]. Ces variations de drainage hydrodynamique interviennent dans tous les types de terrain.

Il est vrai que l'étude des variations dans le temps des eaux thermo-minérales est un peu négligée. Les études effectuées par J.-P. Destombes, 1958, puis M. Jantin 1979 dans le bassin de Vals, en sont d'autant plus précieuses. Nous citerons encore l'exemple du district de Buzias (Roumanie) pour lequel S. Airini et coll. [1] ont montré des cycles rythmiques de CO₂ (4,5 j., 22 j., 17,5 mois et 20 ans) que l'on s'explique mal, mais dont le caractère rythmique est particulièrement intéressant à signaler.

On peut enfin citer l'exemple de toutes les variations reliées à la sismicité [24, 12] que l'on essaye même d'utiliser pour la prévision des séismes, ou des éruptions volcaniques.

Sur ces remarques nous terminerons cet exposé en espérant avoir dégagé la contribution spécifique aux circulations hydrothermales que sont la thermalité et l'effet de gas-lift sans oublier, bien entendu, que le gradient hydrodynamique est toujours présent.

RESUME

Les circulations hydrothermales sont des circulations d'eaux vadoses enfoncées jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 5 à 10 km. Comme les eaux de surface, elles circulent sous l'effet du gradient hydrodynamique, mais la thermalité ou effet de thermosiphon et l'effet de *gas-lift* s'y ajoutent.

Le thermosiphon est une machine thermique soumise au principe de Carnot, c'est-à-dire que seule une faible partie de l'énergie calorifique est transformée en travail mécanique de remontée. De plus, les eaux profondes sont minéralisées, c'est-à-dire plus denses : ceci implique diverses conséquences sur les circuits hydrothermaux. Enfin, dans quelques cas, il peut y avoir ébullition de l'eau, phase vapeur). Hormis ce dernier cas où la chaleur provient d'un magma volcanique, dans la plupart des cas l'essentiel de la chaleur des

eaux thermales provient de la radioactivité des roches à U, Th, K (granites, etc...), drainée par les circulations hydrothermales. Ce drainage est la cause des anomalies géothermiques de surface.

L'effet de *gas-lift* est dû au dégazage du CO₂ en excès dissous dans l'eau ; il provoque un allègement et favorise l'émergence : geysers, sources intermittentes, dépôts de travertins, et divers phénomènes sont associés à cet effet.

En tenant compte de ces trois facteurs on distingue trois concepts théoriques de modélisation des circulations hydrothermales :

- l'ascendance métastable,
- l'ascendance avec évolution,
- l'ascendance sous influence du drainage hydro-dynamique.

1. Arinei St., Demontis G., Pricajan A., Stimut D.O. — Rhythmicity of the carbon dioxide content in the carbogaseous mineral waters of Buzias Spa (Romania). *Rev. Roum. Geol., Geophys. et geogr.*, 1978, 22, 113-137.

2. Anderson L.W., Anderregg J.W., Lawler J.E. — Model geysers. *Am. J. Science*, 1978, 278, 725-738.

3. Armand L. — Considérations hydrologiques sur quelques sources minérales du Massif Central. *Ann. Inst. Hydrol. et Climat*, 1934, 9, 221.

4. Aubignat A. — Hydrogéologie des sources minérales d'Auvergne. *Rev. de l'Industrie Minière*, 1968, 821-831.

5. Aubignat A. — Sources minérales et stations thermales d'Auvergne et du Bourbonnais. *Rev. d'Auvergne*, 1979, 93, 13-86.

6. Barnes H.L. — *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2^e éd., 798 p. Paris, Wiley, 1979.

7. Blaux B. — *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium*. Thèse Paris VI, 1978, 336 p.

8. Batard F., Maisonneuve J., Ristler J.J. — La province hydro-minérale des eaux carbogazeuses d'Auvergne. *Rev. Sc. Nat. d'Auvergne*, 1978, 44, 7-32.

9. Baudron J.C., Bosch B., Degrange P., Lelou M., Marce A., Ristler J.J., Garcia C. — Recherches géochimiques sur les eaux thermales de la bordure ouest de la Limagne. *Bull. Minéral.*, 1979, 102, 676-683.

10. Costesque P., Fortune J.P., Schott J. — On the importance of thermal diffusion in the formation of brines in geothermal systems. *Proceed of the Second Internat. Symp on Mt. Scienc. Geol.*, 1977, IV, 86-97.

11. Degrange P., Pepin D., Ristler J.J., Baudron J.C., Bosch B. — Etude chimique et isotopique de l'eau minérale et des gaz thermaux de Royat P.D. *Cahiers d'Arthrologie*, 1978, VI, 14-25.

12. Delaunay L. — *Recherche, captage et aménagement des sources thermo-minérales*. Baudry et Cie éd., 1899, 692 p.

13. Destombes J.P. — Contribution à l'étude géologique du bassin hydro-minéral de Vais-les-Bains (Ardèche). *Bull. de S.G.F.*, 1958, VII, 893-927.

14. Edmond J.M. — Hydrothermal activity at mid ocean ridge axes. *Nature*, 1981, 890, 87.

15. Fehn U., Cathles L.M., and Holland H.D. — Hydrothermal convection and uranium deposits in abnormally radioactive plutons. *Econ. Geology*, 1978, 73, 1156-1566.

16. Goguel J. — Les conditions hydrologiques profondes dans les granites pyrénéens et l'origine des sources thermales. *Hommage à L. Calender*, 1980, 99-101.

17. Hanaoka N. — Numerical model experiment of hydrothermal system. *Topographic effects. Bull. of the geological Survey of Japan*, 1980, 7, 321-332.

18. Jantlin M. — *Les sources minérales carbogazeuses de Haute Ardèche: Etude géologique et hydrogéologique*. Thèses de III^e Cycle, U.S.M.G., Grenoble, 1979, 220 p.

19. Jumeau T. — La naissance de la croûte océanique. *La Recherche*, 1980, 117, 1374-1383.

20. Maisonneuve J. — Radioactive heat and enthalpy of thermal waters in the French Massif Central. *Terra Cognita Europ. Union of Geo Sciences*, 1980, 120.

21. Maisonneuve J. et Ristler J.J. — La ceinture carbo-gazeuse de l'Europe occidentale. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, 1979, 2, 109-120.

22. Michard G., Fouillat G., Girnaud D., Denis J. — Une méthode globale d'estimation des températures des réservoirs alimentant les sources thermales. Exemple du Massif Central Français. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1981, 45, 1199-1207.

23. Monier G. — *Pétrologie des granitoides du Sud Millévaques*. Thèse III^e Cycle, Clermont, 1980, 310 p.

24. Moret L. — *Les sources thermo-minérales*. Paris, Masson, 1946, 146 p.

25. Norton D. — Transport phenomnal in hydrothermal systems. The redistribution of chemical components around cooling magmas. *Bull. Min.*, 1979, 102, 471-488.

26. Pascal P. — *Nouveau traité de Chimie Minérale t. I, t. VIII*. Paris, Masson, 1965.

27. Ranchin G. — La géochimie de l'uranium et la différenciation granitique dans la province uranifère du Nord Limousin. Thèse Nancy, 1970.

28. Rinehart J.S. — *Geysers and geothermal energy*. Springer Verlag éd., 1980, 224 p.

29. Ristler J.J. — Signification structurale des émergences d'eaux thermominérales dans le secteur de Royat, Chamalières et Clermont-Ferrand. *J. Fr. d'Hydrologie*, 1980, 11, 69-80.

30. Ristler J.J. — Bassin thermo-minéral de Vichy (Allier). *Recap-tage par Forage de la Source Bousange à Bellefleur*. *Rev. de l'Ind. Minière*, 1981, 441-448.

31. Roberts J., Cordell H.S. — Problems of Petroleum migration. *AAPG Studies in geology* no 10.

32. Schoeller H. — *Les eaux souterraines*. Paris, Masson, 1982.

33. Veillard F., Combarous M. — Modélisation d'une source d'eau chaude: transfert de chaleur dans la branche ascendante du circuit hydrothermal. *C.R.A.S.*, 1982, t. 291 D, 63-66.

34. Wilnerpsoon P.A., Wilson C.R., Long J.C.S., Dubois A.O., Galbraith R.M., Gale S.E., Mac Pherson M.M. — Mesures de perméabilité en grand dans les roches cristallines fracturées. *Bull. B.R.G.M. (2)* III, 53-61.

BIBLIOGRAPHIE

Quelques problèmes spécifiques à la recherche et au captage des eaux minérales

M. BOURGEOIS *
(Luchon)

Pour faire ressortir ce qui caractérise la recherche et le captage des eaux minérales, il faut comparer les interventions nécessaires à celles que l'on entreprend pour les eaux potables traditionnelles ; en premier lieu nous ferons un bref rappel des principales différences entre les deux types d'eaux.

CARACTÈRES SPÉCIFIQUES DES EAUX MINÉRALES

Eau potable

L'eau potable est un produit que nous connaissons bien depuis l'école primaire :

Incolore, inodore, sans saveur, agréable à boire, elle doit être exempte de matières en suspension et d'organismes parasites ou pathogènes.

Elle renferme des substances chimiques dissoutes en quantité limitée ; les instances sanitaires nationales ou internationales ont fixé des teneurs maximales tolérables, qui sont relativement semblables dans les différents pays, pour la minéralisation totale et pour certains éléments majeurs ou mineurs.

Dans la pratique, les eaux potables distribuées en France contiennent de quelques dizaines de milligrammes à un ou deux grammes de sels par litre.

Au captage, l'eau potable atteindra généralement une température de 10 à 20 °C et elle sera dénuée de gaz

tels que CO₂ ou H₂S ; dans le cas contraire elle sera refroidie et dégazée avant stockage dans le château d'eau. De même on pourra lui faire subir certains traitements tels que la déferrisation, l'élimination du fluor ou des phosphates, la stérilisation au chlore ou à l'ozone.

Les stations de pompage, qui alimentent une ou plusieurs communes, devront fournir assez couramment quelques dizaines de m³/heure, souvent plusieurs centaines voire plus de 1 000 m³/heure.

La Direction départementale de la santé contrôlera périodiquement la qualité de l'eau distribuée depuis les captages qui seront supervisés techniquement par les services de l'Agriculture ou de l'Équipement ; ces ouvrages de captage, équipés pour exclure toute contamination, seront entourés de trois périmètres de protection dans lesquels les installations et activités polluantes seront interdites ou réglementées.

Eaux minérales

Qu'est-ce qu'une eau minérale ?

Nous empruntons la réponse au Docteur Ninard qui a fait un exposé approfondi sur la question devant les membres de la Société française d'hydrologie et de climatologie médicale le 20 mars 1971.

« L'eau minérale est une eau naturelle, issue de source naturelle ou forée (puits, forage tubulaire, galerie ou combinaison de ces divers modes de captage) dont l'usage, d'après l'avis de l'Académie nationale de Médecine, est reconnu favorable à la santé humaine, pouvant de ce fait être éventuellement utilisable en thérapeutique, son exploitation étant autorisée par arrêté du Ministre chargé de la

* BRGM, Service des eaux minérales et thermales, 22, avenue de Lempdes, 63890 COURNON-D'AUVERGNE.

santé publique dans les conditions prévues par les lois et les règlements en vigueur. »

Le Docteur Ninard précise qu'il s'agit là du point de vue français, après un long développement dans lequel il souligne :

— que le concept d'eau minérale est pratiquement absent dans certains pays tels que : les pays scandinaves, la Hollande et l'Amérique du Nord ;

— que le concept existe dans de nombreux pays, dont la plupart s'attachent, comme la France, à l'aspect qualitatif, tandis que « le concept allemand est essentiellement basé sur des données quantitatives ».

En résumé :

— pour l'eau potable les divers pays reconnaissent des normes physicochimique ou bactériologiques assez voisines et les techniciens n'hésitent pas, si nécessaire à améliorer l'eau par filtration ou autre traitement ;

— pour l'eau minérale les divers pays ont des conceptions différentes ; en France ce n'est pas une composition chimique particulière qui permettra la qualification d'eau minérale, c'est l'agrément ministériel qui confère l'appellation ; il sera accordé seulement à une eau naturelle, non traitée, dont la minéralisation aura été contrôlée par plusieurs analyses.

Il existe ainsi en France un millier de sources d'eau minérale aux caractéristiques extrêmement variées :

— les températures, qui sont souvent voisines de celles des eaux douces classiques, peuvent atteindre 63 °C à Luchon, 65,5 °C sur la source du Dôme à Vichy (03), 75,5 °C à Nyer (66), 77,8 °C sur la source Rossignol à Ax-les-Thermes (09), 80,5 °C sur la source du Par, à Chaudesaigues (15).

— La minéralisation totale va de 20 à 30 mg/litre sur la Bonne Fontaine Charrier, à Laprugne (Allier) à 6 à 8 g/litre, assez couramment sur les eaux chaudes carbogazeuses du Massif Central, à 10 à 18 g/litre sur les eaux chlorurées-sodiques de Saint-Martin d'Uriage (38), de Balaruc-les-Bains (34), voire 300 g/litre sur certaines saumures que l'on trouve par exemple à Oraas (64) ou 4 000 cols auraient été remplis en 1961 !!!.

Les eaux les plus chargées servent essentiellement aux applications externes, mais il est possible de prendre aux buvettes des eaux renfermant un ou plusieurs éléments à des teneurs bien supérieures à celles qui sont admises par les normes de potabilité.

— Les gaz associés donnent à l'eau une odeur, une saveur ou des propriétés spécifiques ; le CO₂, qui est le plus fréquent, atteint couramment un débit égal au débit d'eau sur certaines sources, mais parfois le double, voire le quadruple ou plus.

— Les débits d'eau sont généralement faibles, c'est-à-dire inférieurs à 10 m³/heure sur environ 93 p. cent des sources et supérieurs à 50 m³/heure, sur 2 p. cent seulement des sources autorisées.

— Enfin, le périmètre de protection pris au titre de la loi du 14 juillet 1856 autour de certaines sources déclarées

d'intérêt public, vise davantage à protéger le débit des sources, que la qualité de l'eau, alors que nous l'avons vu plus haut, c'est pour conserver à l'eau ses qualités que l'on établit les trois périmètres « immédiat », « rapproché » et « éloigné » autour des stations de pompage d'eau potable.

LA RECHERCHE DES EAUX MINÉRALES

Recherche hors de France

Certains pays en développement qui importent de plus en plus d'eaux embouteillées, des eaux de table ou des eaux minérales, désirent parfois exploiter et embouteiller sur place des eaux du type de certaines eaux minérales françaises, des eaux plates de minéralisation faible à moyenne généralement.

Le commanditaire demande parfois une première étude de « débroussaillage » pour localiser et présenter quelques caractéristiques principales des aquifères susceptibles d'être étudiés ensuite plus complètement. Dans d'autres cas il connaît des sources et veut un premier avis sur leur débit potentiel et la qualité de l'eau ; ou bien il indique directement la région à prospecter, la ville à côté de laquelle il souhaiterait pouvoir installer l'usine d'embouteillage !..

Dans ces différentes hypothèses, le canevas de l'étude hydrogéologique n'est pas très différent de celui d'une recherche d'eau potable ; il comportera en principe :

— un aperçu sur la géologie régionale d'après les cartes et autres documents géologiques accessibles,

— le repérage des formations aquifères, de leurs limites, l'estimation de leurs caractéristiques hydrauliques, de la qualité de l'eau,

— la localisation des zones les plus favorables aux captages ou la probabilité de succès dans les secteurs choisis par le commanditaire,

— la programmation des ouvrages de reconnaissance,

— normalement ensuite — mais pas toujours ou parfois longtemps après — la surveillance des travaux proposées.

Après découverte du débit et de la qualité recherchée, la réalisation de l'ouvrage définitif exigera une durée très variable. En effet, l'absence de législation sur les eaux minérales ou la concision des textes existants peut faciliter la délivrance rapide de l'autorisation d'exploitation ; quelquefois, au contraire, ce manque de législation amènera des fonctionnaires consciencieux à s'informer longuement avant de prendre la décision attendue.

Recherche en France

La recherche d'eau minérale dans un site absolument neuf est probablement assez rare de nos jours, en France. Il y a plusieurs raisons à cela :

— les sources débitant naturellement une eau minérale originale et intéressante par sa température, sa composition ionique, sa teneur en gaz dissous, etc. sont connues pour la plupart et utilisées depuis très longtemps parfois ;

— les nombreuses exploitations d'eau minérale fournissent déjà une grande variété d'eaux pour l'embouteillage et l'hydrothérapie ; on ne ressent donc pas spécialement le besoin de rechercher de nouveaux types d'eaux, ou une eau d'un certain type, dans une région différente de celle qui la produit déjà.

En revanche, il est plus fréquent de travailler sur des sites existants, par exemple :

- pour régénérer un ouvrage vétuste ;
- pour recapter par un nouvel ouvrage une source devenue inexploitable ;
- pour créer des captages supplémentaires en vue d'accroître le débit disponible dans une station thermale ou d'améliorer la qualité de l'eau, sa température, son débit de gaz, etc.

La réfection des captages sur le site même peut être imposée — par la topographie, l'occupation des terrains environnants — ou particulièrement avancée :

- lorsque l'établissement thermal ou l'usine d'embouteillage sont récents, bien aménagés et que l'on a intérêt à réduire la longueur des canalisations d'amenée d'eau ;
- lorsqu'il faut recapter une eau identique à celle qui est commercialement connue, ou médicalement appréciée, sous peine d'échec ; or en s'éloignant des anciennes sources, le contexte hydrogéologique peut changer, les ouvrages auront éventuellement une faible productivité, ou encore l'eau sera très différente de celle recherchée.

A l'inverse, en présence de bâtiments mal équipés ou vétustes, de points d'eau défectueux, mal situés, difficiles à protéger, il y aura intérêt à rechercher ailleurs un nouveau site de captage susceptible de fournir une eau de bonne qualité qui sera transportée vers des bâtiments rénovés ou encore utilisée dans un nouvel établissement fonctionnel construit à proximité de la nouvelle source.

QUELQUES MÉTHODES ET TECHNIQUES DE RECHERCHE DES EAUX MINÉRALES

Les moyens d'approche pour découvrir des eaux minérales s'apparentent partiellement à ceux utilisés pour les eaux potables classiques, bien qu'ils soient plus variés, par suite de la diversité de nature des eaux minérales, de leurs conditions d'emmagasinement et de circulation dans le sous-sol.

On distingue trois grandes catégories de réservoirs :

— *Des aquifères sédimentaires étendus*, par exemple la craie à St-Amand-les-eaux (Nord), les sables fluvio-glaciaires d'Evian (Haute-Savoie), les calcaires dolomitiques du Crétacé à Dax (Landes), les calcaires éocènes des Abatilles (Gironde).

— *Des couches lenticulaires perméables* séparées par des marnes imperméables et qui communiqueraient verticalement par des conduits jalonnant des failles, par exemple dans le bassin Vichy-Saint-Yorre.

— *Des réseaux de fractures*, en terrains cristallins ou calcaires, avec remplissage filonien éventuel et de vides parallèles à la stratification ; on rencontre ce type de réservoir fissural dans les granites du Massif Central au sens large, à Royat, à Châtelguyon, au Mont-Dore, à Saint-Nectaire, à Saint-Galmier, dans les schistes primaires de Lamalou ou dans les calcaires de Balaruc-les-Bains (Hérault).

L'ordre d'énumération de ces trois types de réservoirs correspond à celui de l'accroissement de la difficulté à y découvrir l'eau : si les risques d'échec sont faibles dans les aquifères sédimentaires étendus ou même lenticulaires, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit d'obtenir dans un réseau de fissures une eau suffisamment chaude, suffisamment minéralisée ou riche en gaz, bien isolée de l'eau banale superposée ou juxtaposée.

L'étude préalable à l'implantation d'ouvrages de reconnaissance sur un site hydrominéral existant comprend habituellement quatre ou cinq phases.

Étude documentaire

Les informations relatives aux sources autorisées sont conservées au Service des Mines, qui est chargé de la supervision technique des captages, et en principe dans les archives de la société exploitant des sources.

Il s'agit de plans de situation, de croquis divers concernant la géométrie et « l'architecture » des ouvrages, de relevés géologiques, de résultats d'analyses chimiques et bactériologiques, de notes, rapports et publications.

Les documents sont assez souvent dispersés ou incomplets en particulier pour ce qui est de l'aspect quantitatif de la ressource.

Si le débit naturel de débordement de la source a été mesuré au moment des travaux, on manque de données ensuite sur sa diminution en fonction du temps, par entartrage progressif des griffons par exemple.

Lorsque des puits, des galeries, des forages ont été réalisés, les pompages d'essai n'ont pas été exécutés méthodiquement ; on ignore totalement la

durée des pompages, l'évolution du débit et celle du niveau dynamique, pendant le fonctionnement, et après l'arrêt de la pompe.

Observations sur les sources existantes

La visite des sources permet l'observation des terrains aquifères et de leurs épontes et les conditions de circulation de l'eau.

Outre le contrôle in situ des caractéristiques physico-chimiques de l'eau on peut généralement faire des essais de débit. Pendant la saison thermale ou la période d'activité de l'usine d'embouteillage, l'hydrogéologue devra se contenter de faire quelques mesures de niveaux au débit d'exploitation. Si la pompe ne tourne pas en continu, il pourra peut-être intercaler de brefs pompages pendant les heures d'interruption de l'exploitation.

Hors saison thermale, il lui sera possible de faire des pompages d'essai plus rationnels, de poursuivre assez longtemps les mesures sur la source éprouvée et sur les points d'eau environnants.

Enquête géologique régionale

Après consultation des cartes et documents régionaux, le géologue étudiera soigneusement le terrain au point de vue lithologique et structural en tenant compte des données morphologiques visibles sur les photos aériennes.

Les indices hydrogéologiques tels que : sorties d'eau minérale, mofettes de CO₂, dépôts-témoins de travertins, d'oxydes de fer et autres produits d'évaporation seront mentionnés sur la carte détaillée.

Prospections géochimique et géophysique éventuelles

Comme en prospection minière, la géochimie fait partie des méthodes d'approche pour la recherche de certaines eaux minérales.

L'application la plus courante consiste à doser le gaz carbonique sur des prélèvements d'air dans des petits sondages implantés selon un maillage régulier ; le report sur cartes des valeurs obtenues permet le repérage des zones où les sorties de CO₂ sont les plus accusées, ces zones étant a priori plus fracturées.

Dans des conditions similaires, on peut envisager la prospection systématique d'autres constituants typiques de l'eau minérale recherchée, par exemple :

- des gaz associés tels que H₂S, CH₄, He, etc.
- des éléments chimiques tels que : B, Li, As, F, etc.

De même on peut faire appel à la géophysique pour préciser localement la lithologie, la présence

de cavités peu profondes, des anomalies structurales ou encore une zonation thermique.

Programmation des travaux de reconnaissance

La synthèse des divers résultats de l'étude permettra à l'hydrogéologue de concevoir et de décrire les ouvrages les plus aptes à la découverte de l'eau minérale souhaitée ; il s'agira de sondages, le plus souvent, qui seront parfois aménagés ensuite pour l'exploitation.

En rédigeant les spécifications techniques des sondages, l'hydrogéologue aura le souci :

- de donner assez de détails pour faciliter l'homogénéité des réponses des entreprises consultées et pour limiter les questions en cours d'exécution ;
- de prendre néanmoins des marges assez confortables dans les longueurs à forer et à tuber pour s'adapter aux imprévus de la reconnaissance.

L'hydrogéologue soulignera la nécessité de surveiller les travaux en vue de les conduire à bonne fin et de faire, au fur et à mesure de l'avancement, toutes observations et mesures pour définir au mieux les caractéristiques du terrain et celles de l'eau minérale. A défaut d'intervention en temps opportun, les renseignements perdus seraient irrécupérables ensuite.

Que les travaux soient, ou ne soient pas couronnés de succès, il faudra en rédiger un compte rendu détaillé qui intéressera tout autant les responsables de l'exploitation que ceux qui seront amenés à faire plus tard d'autres recherches.

Quelques illustrations

Extraites d'études récentes, les figures présentées ci-après traduisent quelques traits spécifiques du « comportement » des sources d'eau minérale.

Source Louise à Châtelguyon

Le limnigramme obtenu sur la source Louise (fig. 1), à Châtelguyon (63) traduit les variations continues du niveau piézométrique sous l'effet des arrivées de gaz carbonique qui s'échappe à l'air libre.

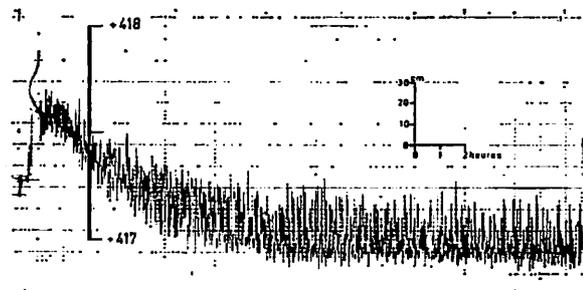


Fig. 1. — Limnigramme enregistré sur la source Louise à Châtelguyon (Puy-de-Dôme).

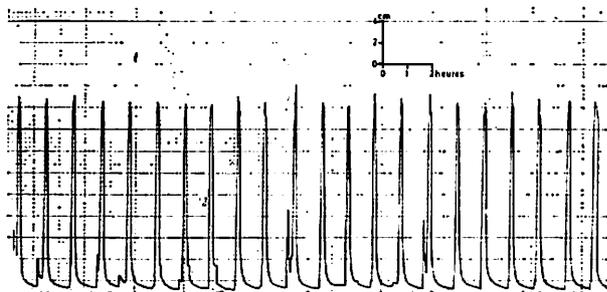


Fig. 2. — Etablissement hydrominéral à Sainte-Marguerite (Puy-de-Dôme). Evolution du débit sur la source Chapin.

Outre ces variations de 0,20 à 0,30 m, on notera le « tassement » du niveau moyen : proche de l'altitude + 417,60 pendant la première heure, il diminue progressivement pendant 10 heures pour osciller ensuite autour de + 417.

Cet enregistrement a été réalisé après installation d'un tube prolongeant vers le haut celui qui équipe normalement le forage de la source Louise. La partie supérieure ouverte de ce tube se situait à la cote + 418. En abaissant très peu le niveau de sortie un léger débordement se produit ; l'allègement de la colonne d'eau qui en résulte suffit à libérer du CO₂ qui entraîne l'eau par émulsion pour aboutir aux débits stabilisés ci-après :

Cote de sortie (m) au-dessus du niveau de la mer	Débit jaillissant en m ³ /heure
+ 418	0
+ 417,67	12,07
+ 416,99	13,42
+ 416,26	14,29
+ 415,77	14,72

Ce tableau montre que :

— en baissant le niveau de sortie de l'eau, le débit augmente corrélativement assez peu ; par extrapolation des résultats observés on estime qu'un pompage avec niveau dynamique à + 410 ne donnerait guère que 17 m³/heure ;

— à l'inverse, il serait possible de maintenir le jaillissement d'un certain débit à + 419, + 420, ou même plus haut, à condition d'amorcer l'émulsion par pompage durant quelques minutes.

Sources Chapin et le Héron

Les figures 2 et 3, illustrent l'intermittence du débit d'eau carbogazeuse sur les sources Chapin et le Héron, à l'Etablissement hydrominéral de Sainte-Marguerite (Puy-de-Dôme).

L'eau issue périodiquement de ces forages

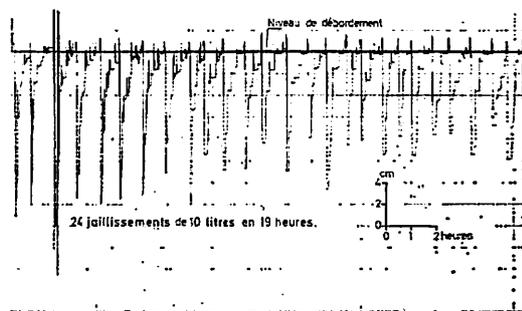


Fig. 3. — Etablissement hydrominéral à Sainte-Marguerite (Puy-de-Dôme). Evolution du débit sur la source Le Héron.

s'écoule dans un récipient sur lequel est placé le limnigraphe :

— sur la figure 2, l'eau monte assez rapidement de 17 à 18 centimètres toutes les 65 minutes et l'écoulement dure au total 15 à 30 min suivies de 35 à 50 min d'interruption ; à chaque cycle on mesure 220 litres d'eau, soit un débit moyen de $220 : 65 = 3,4$ litres/min ;

— sur la figure 3, le récipient assez large donne une image cyclique moins précise, mais le jaillissement de 10 litres d'eau à chaque fois se fait en moyenne toutes les 48 min, ce qui donne un débit moyen de 0,21 l/min.

Source Papon à Saint-Nectaire

Plusieurs sources d'eau thermominérale carbogazeuse sont captées dans trois galeries creusées dans le granite à trois niveaux différents ; grâce à des cheminées de communication l'eau en pression remonte des galeries inférieure et moyenne dans la galerie supérieure, d'où part la distribution.

Pour contrôler l'influence éventuelle de futurs captages, il convenait de mesurer avant tous travaux le débit global des sources.

Un déversoir à contraction latérale installé sur le canal en béton distribuant l'eau permettait de connaître à tous moments le débit, en fonction de la hauteur d'eau à l'amont. Celle-ci variant continuellement a été enregistrée et le limnigramme de la figure 4 révèle un mouvement cyclique très régulier facile à convertir en débit.

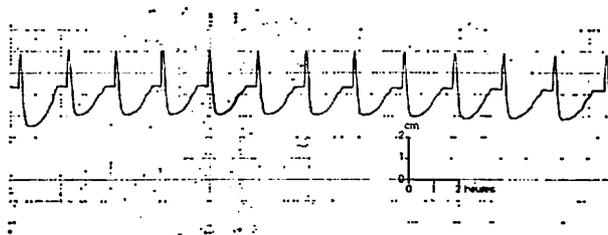


Fig. 4. — Source Papon à Saint-Nectaire. Evolution du débit.

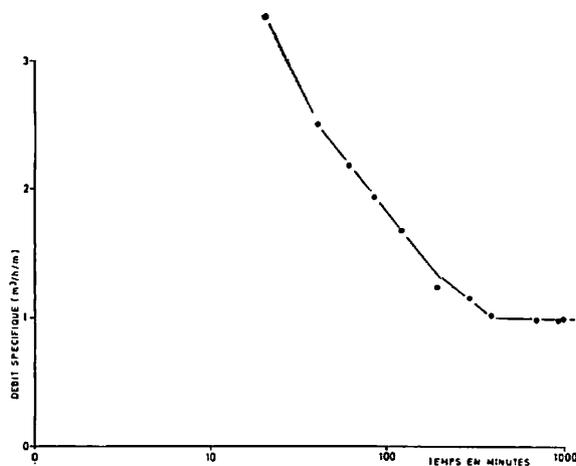


Fig. 5. — Forage A₂ à Saint-Nectaire. Diagramme de pompage.

Forage A₂ à Saint-Nectaire

Il s'agit d'un diagramme représentatif des résultats du premier pompage effectué sur le forage A₂ de Saint-Nectaire, profond de 44 mètres (fig. 5).

Par suite d'une diminution du débit pompé dans les premières heures de l'essai, le diagramme représente l'évolution du débit spécifique en fonction du logarithme du temps. On constate qu'après 6 h 30 de pompage le débit spécifique est bien stabilisé jusqu'à la fin du pompage qui a duré 16 h 15 min. Ce débit de 1 m³/h/m a été obtenu avec 4,4 m³/heure pour 4,4 m de rabattement.

La figure 6 regroupe plusieurs diagrammes thermiques relevés sur le forage A₂ de Saint-Nectaire, d'abord lorsque le forage atteignait 44,50 m de profondeur (diagrammes A₁ et B₁) et ensuite lorsqu'il a été approfondi à 56,50 m (diagrammes A₂ et B₂).

— A₁ correspond aux températures mesurées sur l'eau sortant du trou pendant la foration au marteau de fond ;

— B₁ est une thermographie point par point effectuée de haut en bas dans le forage au repos, le niveau de l'eau étant à 6,40 m sous le sol ;

— A₂ correspond aux températures relevées en cours de la foration de 44,50 à 56,50 m ;

— B₂, est une thermographie dans le forage approfondi à 56,50 m et débitant alors par artésianisme.

CAPTAGE DES EAUX MINÉRALES

Les différents types d'ouvrages de captage des eaux minérales sont bien connus, des plus anciens aux plus récents.

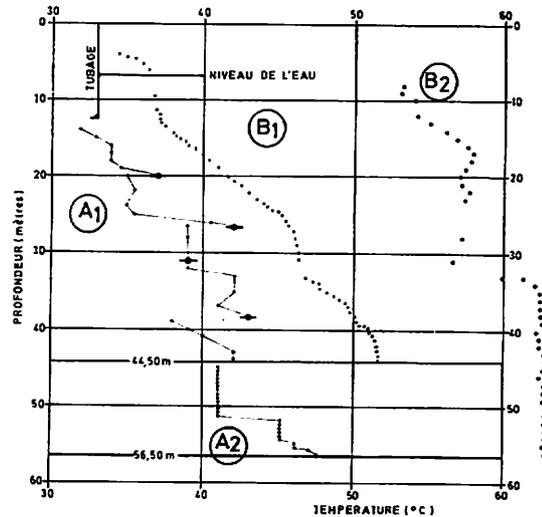


Fig. 6. — Diagraphie thermique sur le forage A₂ à Saint-Nectaire.

Dans une fissure du rocher, où la source se manifestait, les hommes ont d'abord installé un tuyau cimenté sur son pourtour afin de recueillir ponctuellement et de protéger un peu l'eau minérale. Ce genre de captage direct dans le griffon existe encore assez fréquemment aujourd'hui.

Lorsqu'il rencontrait plusieurs griffons plus ou moins bien individualisés dans le fond d'une dépression, l'homme a éliminé les sables, la vase, les plantes et la matière organique pour mettre à nu le rocher ; il a ensuite construit une murette autour des griffons et recouvert son bassin de captage, pour protéger la réserve d'eau se déversant par un trop-plein.

Le débit naturel des sources devenant parfois insuffisant, nos ancêtres ont dû l'augmenter en abaissant l'exutoire à partir de tranchées et de galeries, ou mieux, pomper dans des puits de plus en plus profonds.

Ayant atteint une certaine profondeur, les puisatiers ont voulu augmenter encore le débit du puits ; ils ont creusé des galeries en suivant les conduits aquifères appelés couramment des « veines » ou des « filons » d'eau.

Au 19^e siècle les forages au battage, puis à la rotation sont apparus ; vers 1880-1890 certains ingénieurs des Mines, comme G. Friedel, faisaient installer des équipements déjà très élaborés tels que tubages concentriques en cuivre avec cimentation extérieure et obturateurs vissables depuis la surface pour fermer l'espace annulaire de la colonne de remontée de l'eau gazeuse.

Un siècle plus tard, en 1981, on rencontre encore des partisans du puits en grand diamètre creusé manuellement, mais le sondage vertical — ou ex-

ceptionnellement incliné — est préféré dans la plupart des cas pour plusieurs raisons :

— le sondage de recaptage courant, de quelques dizaines de mètres de profondeur, est exécuté rapidement donc à bas prix par rapport au puits équivalent. L'intérêt du sondage augmente encore s'il faut descendre à 50 ou 80 m, voire davantage, où le puits devient alors irréalisable pratiquement ;

— le fonçage d'un puits d'eau minérale est particulièrement pénible pour les ouvriers lorsque l'eau est à température élevée et que les gaz rendent l'atmosphère irrespirable ;

— l'équipement des ouvrages avec des tubes et crépines capables de résister longtemps aux eaux corrosives est en acier inoxydable de haute qualité. Le coût en est abordable sur des forages de diamètre courant ; il devient très onéreux sur les forages en grand diamètre et prohibitif sur les puits ;

— la cimentation sous pression entre tubage et terrain ou entre deux colonnes de tubes concentriques est également rapide, efficace et peu onéreuse sur les forages ; les cuvelages en béton armé autour des puits de deux mètres de diamètre, ou plus, représentent un temps de travail assez long, l'adhérence au terrain est souvent imparfaite et les hétérogénéités ou les fissures compromettent quelquefois l'étanchéité du béton vis-à-vis des eaux superficielles ;

— la stérilisation d'un forage après évacuation complète des produits utilisés pendant la foration est nettement plus facile que celle des vastes parois plus ou moins rugueuses et poreuses des cuvelages de puits ; par la suite, la protection du forage contre la pollution est également plus simple à assurer que celle d'un puits visitable par l'homme.

CONCLUSION

Quelques réflexions peuvent être dégagées à l'issue de cet exposé.

Particularités de la recherche et du captage des eaux minérales

On peut retenir :

— *des contraintes opérationnelles* : malgré l'aide efficace du personnel technique des sociétés exploitantes, les observateurs sont souvent obligés de travailler à côté des sources captées, très proches les unes des autres, dans des sites exigus où les mesures sont parfois difficiles en égard à la complexité des installations ou pénibles, si l'eau est

très chaude et les dégagements gazeux importants. Certaines interventions à faire en dehors de la période d'exploitation sont limitées à quelques mois ou à quelques semaines tandis qu'en saison thermale certains travaux pourront être temporairement arrêtés ;

— *des contraintes psychologiques* : l'eau minérale est un produit de haute qualité par rapport à l'eau banale ; certains gestionnaires d'un tel produit craignent parfois les interventions sur leurs sources, considérées un peu comme un don du ciel, à conserver précieusement en bon état.

Dans les stations hydrominérales, une mauvaise connaissance de la ressource sur le plan quantitatif est très fréquente

On connaît statistiquement beaucoup mieux la productivité des ouvrages et les paramètres hydrauliques des aquifères sollicités par les puits d'eau potable sur lesquels on réalise communément des pompages d'essai.

Cette constatation est paradoxale, compte-tenu de la valeur relative des deux types d'eau. Il faut en outre rappeler :

— que seuls des pompages d'essai méthodiques sur les aquifères complexes de nombreuses sources minérales permettront d'en appréhender les limites ;

— qu'on ne connaît bien les caractéristiques physico-chimiques d'une eau minérale, et surtout leur stabilité, qu'après une série de dosages sur prélèvements effectués à l'occasion de pompages à plusieurs débits, pendant une durée suffisante.

L'amélioration quantitative et qualitative des eaux minérales ne peut que favoriser le développement du thermalisme

A ce propos, il serait probablement avantageux de remplacer une série de sources mineures par quelques recaptages bien réalisés, ce qui simplifierait en outre l'exploitation.

Ces recaptages de bonne productivité, efficacement protégés contre toute contamination, devraient fournir des eaux à minéralisation bien typée très stable dans le temps.

Pour les eaux thermales, on rechercherait en maints endroits des températures plus élevées de façon à éviter le réchauffage, contre-indiqué médicalement, et de plus en plus onéreux. Accessoirement, et sans nuire au thermalisme, on envisagerait des captages d'eaux chaudes, dont les calories seraient utilisées pour le chauffage des bâtiments.

Les gaz associés aux eaux thermominérales

F. MERCIER-BATARD, J.-J. RISLER *
(Strasbourg)

La présence de gaz associés aux sources et captages d'eau thermominérale se traduit souvent par des effets spectaculaires : phénomènes geysériens dus à un effet de « gas-lift », bouillonnements bruyants.

Ces manifestations sont caractéristiques des sources carbogazeuses, nombreuses dans le Massif Central français (fig. 1 et 2).

Au gaz qui se dégage à la pression atmosphérique, gaz libre en excès, ou gaz « spontané » de L. Armand [1], il faut ajouter le gaz qui reste sous forme dissoute dans l'eau thermale.

Des teneurs élevées en gaz dissous, sans dégazage apparent à l'émergence, sont très fréquentes.

L'examen des analyses chimiques, réalisées par le BRGM, des gaz associés à plus de 80 sources ou groupes de sources thermominérales de France et de l'étranger conduit à distinguer deux groupes principaux de dégagements gazeux :

— celui des sources à dégagement d'anhydride carbonique prépondérant. Les débits gazeux sont souvent considérables ;

— celui des sources à dégagement d'azote prépondérant et où les gaz rares peuvent atteindre des teneurs élevées. Les débits gazeux sont moins importants en volume que les précédents ;

— un groupe intermédiaire, à composition mixte, recueille un certain nombre de sources.

Une représentation cartographique des dégagements gazeux les plus typiques fait apparaître des groupements qui suggèrent l'existence de provinces contrôlées par des structures, ou des phénomènes géologiques majeurs.

En France (fig. 3) cette notion est bien illustrée par la province hydrominérale des eaux carbogazeuses d'Auvergne dont les sources jalonnent une direction méridienne correspondant à des manifestations volcaniques récentes qui s'étirent d'Agde au Sud à la Chaîne des Puys au Nord et qui est celle des grandes failles Nord-Sud de Limagne d'âge alpin.

On trouve sur cet axe : Pougues, Theneuille, Vichy, Chatelguyon, Royat, La Bourboule, le Mont-Dore, Saint-Nectaire, puis au Sud, Chaudes-Aigues, le groupe de Lamalou-les-Bains et enfin le Boulou.

Remarquons ici que cet alignement Nord-Sud souligne une zone charnière du Massif Central caractérisée par un amincissement de la croûte terrestre et une remontée du manteau supérieur.

Un ensemble de sources thermominérales où prédominent azote et gaz rares, beaucoup moins gazeuses que les précédentes caractérise une province à azote de direction hercynienne (SW - NE), avec, à l'Ouest du sillon houillier et dans le socle, les sources d'Evaux et de Nérès, et de part et d'autre du Morvan : Bourbon-Lancy, Saint-Honoré-les-Bains et Santenay.

Cette province à azote se prolonge dans les Vosges où l'on trouve Plombières, Bain-les-Bains.

A plus petite échelle on peut aussi définir une province carbogazeuse péri-alpine (fig. 4).

Cette ceinture appartient à une aire continentale affectée par une tectonique cassante et où le dégazage de la croûte inférieure et du manteau supérieur se traduit par un hydrothermalisme à CO₂ libre et abondant.

D'Ouest en Est on trouve les Pyrénées Orientales, le Languedoc et le couloir rhodanien, le Massif schisteux rhénan, l'Erzgebirge et les Sudètes.

Cette ceinture est aussi caractérisée par des séries volcaniques récentes alcalines.

* Service géologique régional Alsace, 204, route de Schirmeck, 67200 STRASBOURG.

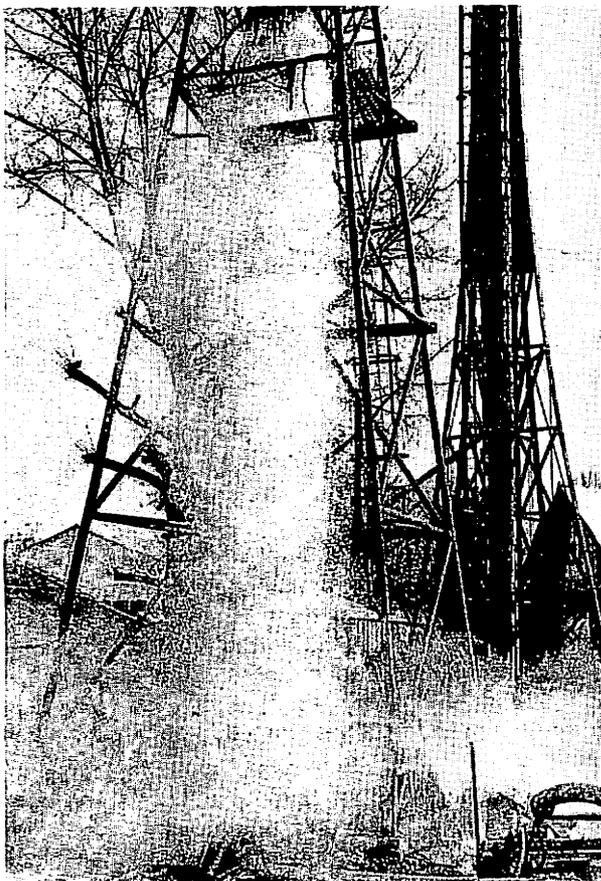
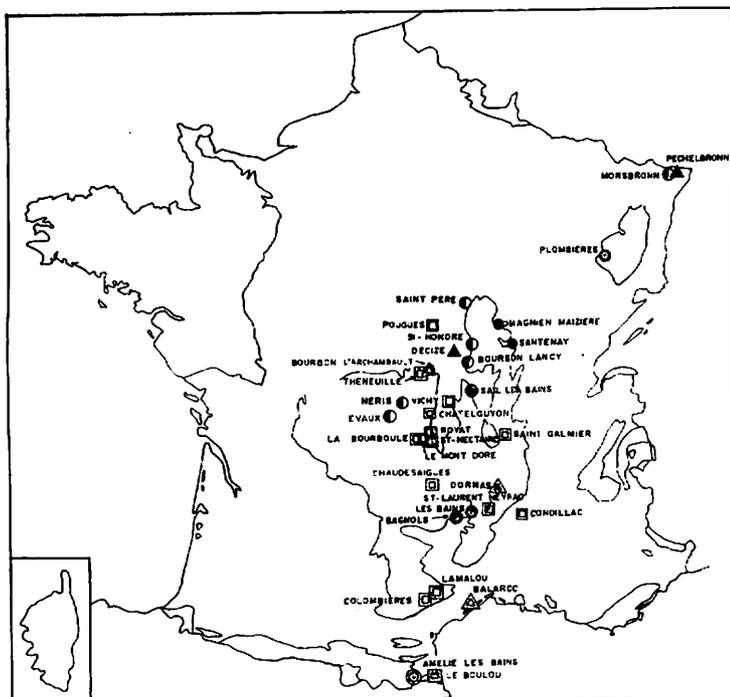


Fig. 1. — Le geyser carbogazeux de Boussange (Allier).



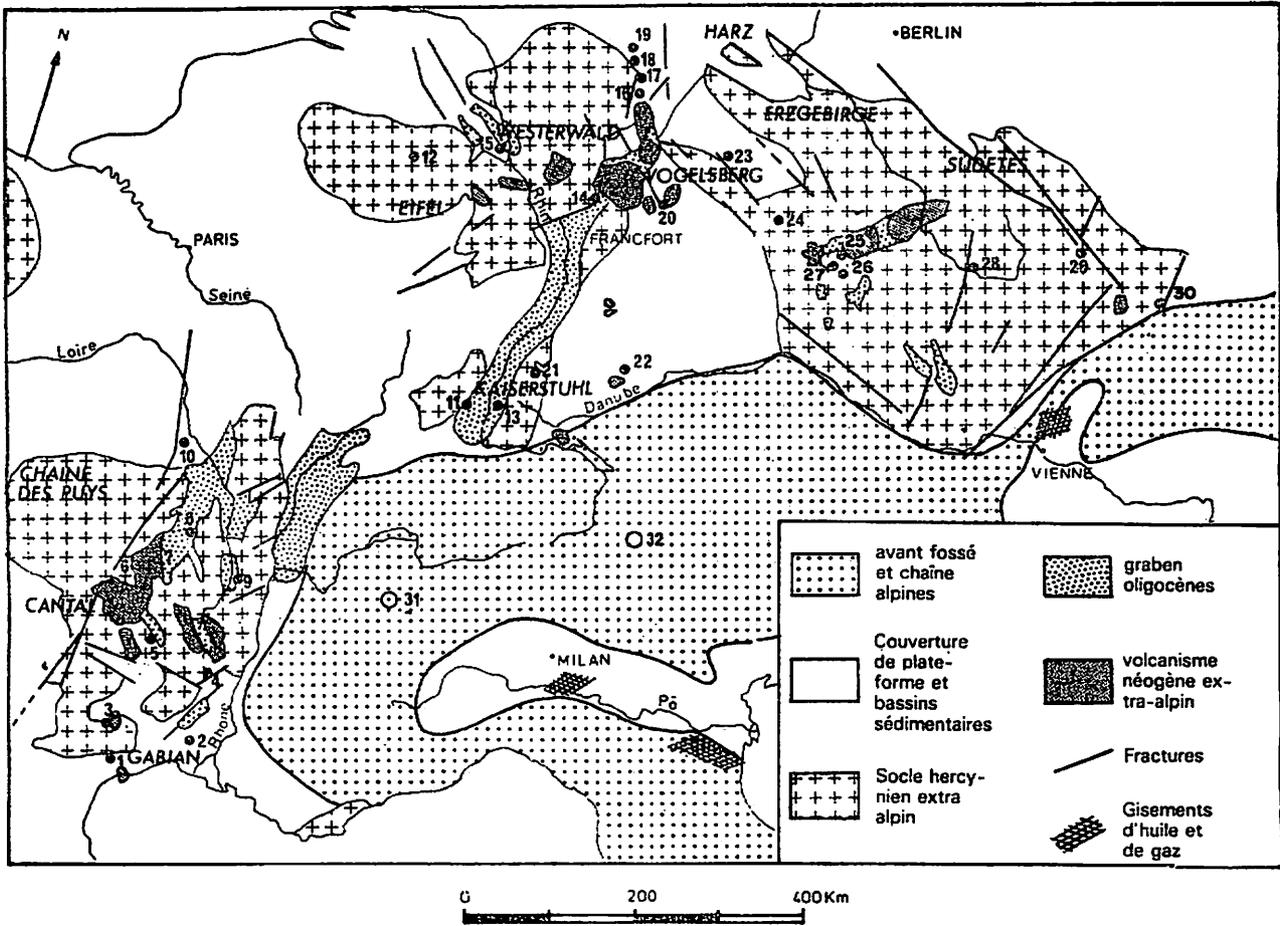
Fig. 2. — Le bouillonnement de gaz en tête du forage du Ban à Chaudes-Aigues (Cantal).



Légende

$CO_2 > 80\%$	} □
$N_2 < 20\%$	
$A + He > 1\%$	
CO_2 de 80 à 20%	} ▲
N_2 de 20 à 80%	
$A + He < 1\%$	
$A + He > 1\%$	} ⊙
$He > 1\%$	
$N_2 > 80\%$	
$CO_2 < 20\%$	} ●
$He > 1\%$	
$He > 5\%$	

Fig. 3. — Les gaz des sources thermales françaises.



Sources thermales carbo-gazeuses

- CO₂ mantellique

France

1. Lamalou
2. Vergèze ("Perrier")
3. Andabre - Gissac
4. Vals
5. Saint-Géron
6. La Bourboule - Le Mont Dore
7. Royat - Chatelguyon
8. Vichy
9. Saint-Galmier
10. Pougues
11. Soultmatt

Belgique

12. Spa

Allemagne (RFA)

13. Bad Kroningen
14. Bad Nauheim
15. Bad Neuenahr
16. Bad Driburg
17. Bad Heilberg
18. Bad Salzflun
19. Bad Oeynhausen
20. Bad Kissingen
21. Bad Peterstal
22. Bad Boll

Allemagne (RDA)

23. Gotha
24. Bad Steben

Tchécoslovaquie

25. Karlovy Vary
26. Marianske Lazne
27. Frantiskovy Lazne
28. Podedbrady
29. Kudowa
30. Jesenik

- CO₂ thermométamorphique

France

31. Salins - Moutiers

Suisse

32. Tarasp

(d'après A. DE GOER de HERVE et J. MERGOIL, 1971, A. PERRODON, 1966, et J. MAISONNEUVE, J.J. RISLER - 1979).

Fig. 4. — La ceinture péri-alpine carbogazeuse.

LES SOURCES CARBOGAZEUSES

Une eau carbogazeuse est une eau à CO_2 libre en excès ou à teneur en bicarbonate (HCO_3^-) dissous supérieure à 300 mg/l ; cette teneur correspondant à la saturation en bicarbonate de calcium d'une eau vadose traversant un massif calcaire.

Identification, dosage et prospection du CO_2

Une identification et un dosage rapide du CO_2 libre, sur le terrain est possible à l'aide de l'appareil de Karat. Cet appareil consiste essentiellement (fig. 5) dans un tube en verre gradué ayant la forme d'une burette d'une contenance de 125 ml et avec un réglage de zéro automatique.

On chasse par agitation une partie de l'anhydride carbonique contenu dans un prélèvement d'eau.

Le volume d'eau déplacé correspond à un certain nombre de divisions du tube gradué ; ce chiffre est reporté sur un abaque qui tient compte de la température de l'eau gazeuse et du CO_2 qui reste en solution à la pression atmosphérique conformément à la loi de Henry, après agitation et dégazage partiel ; on obtient en abscisse la teneur totale de l'anhydride carbonique contenu dans l'eau.

La prospection de l'anhydride carbonique dans les sols par dosages dans un volume d'air donné prélevé par pompage dans un réseau de petits sondages (fig. 6 et 7) aboutit à l'établissement de cartes iso-anomales de CO_2 .

Dans certaines régions, tel le Massif Central français, les dégagements abondants de CO_2 se manifestent à l'aplomb d'accidents profonds souvent masqués par les terrains de recouvrement.

Après élimination du bruit de fond local dû au CO_2 organique on peut délimiter des zones favorables à l'implantation de captages de CO_2 et d'eau minérale carbogazeuse.

Mesure des débits gazeux

Les débits d'anhydride carbonique peuvent être considérables. Des mesures effectuées en 1974 sur le forage artésien ayant recapté la source du Moulin du Ban à Chaudes-Aigues (Cantal) ont donné un débit de gaz de 30 litres/min pour 90 litres/min d'eau thermale (fig. 8 et 9). Il se dégage ainsi, à l'heure, 1 596,6 litres de CO_2 , 174,6 litres de N_2 et 4,12 litres d'He.

Des débits de gaz très supérieurs ont été calculés à Royat (Puy de Dôme) pour le puits Eugénie où, en pompage, 150 m^3/h de gaz accompagnent 100 m^3/h d'eau. Il se dégage ici, à l'heure, 149 100 litres de CO_2 , 540 litres de N_2 , et 0,0015 litre d'He.

Dans le Bassin de Vichy, le forage Boussange est

exploité au débit artésien de 200 litres/min auquel est associé un débit carbogazeux de 965 litres/min, soit 58 m^3/h .

Ces dégagements carbogazeux ont un caractère régional et de nombreuses émanations de gaz carbonique sec (mofettes) passent inaperçues la plupart du temps. Parmi les mofettes connues, il faut citer celle de la Grotte du Chien à Royat ainsi que celles qui jalonnent la faille de Job en Forez ou encore celles des rives de l'Allier au niveau de Saint-Maurice d'Allier et des Martres d'Artières.

Il faut remarquer une certaine variabilité des débits de gaz dans le temps en particulier liée aux variations de pression atmosphérique.

Les prélèvements ont été réalisés avec des ampoules de verre de 250 ml équipées d'un robinet Rotaflo.

La géochimie des gaz

Les gaz libres ont été recueillis par déplacement d'eau minérale introduite au préalable dans l'ampoule et les gaz dissous ont fait l'objet d'autres prélèvements en plongeant dans l'émergence des ampoules sous vide.

Les analyses chimiques ont été effectuées au moyen d'un chromatographe de marque Girdel de la série 3 000.

Le CO_2 constitue l'essentiel de la phase gazeuse non condensable dans le cas des sources carbogazeuses typiques, il dépasse 95 p. cent et atteint jusqu'à 99 p. cent dans de nombreuses localités : Royat, Saint-Nectaire, Châtelguyon (tableau I), le Mont-Dore (tableau II), le Sud et le Sud-Est du Massif Central français (tableau I) avec Lamalou, Neyrac-les-Bains.

Des compositions chimiques analogues ont été trouvées au Cameroun (Adamaoua : Lahoré Vina), en Martinique (Absalon), en Californie (Clear Lake, Mount Shasta).

— La composition isotopique $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ varie de — 5,2 (Saint-Diéry - Puy de Dôme) à — 8,0 (Thizon - Allier) (tableau 3) ; cette composition isotopique du carbone dans l'anhydride carbonique est comparable à celle du carbone des gaz volcaniques provenant du manteau (origine endogène).

Afin de compléter les données obtenues sur le CO_2 gazeux, le carbone a été étudié sous ses différentes formes chimiques : bicarbonates, anhydride carbonique et méthane.

Le gaz peut être recueilli à l'état libre par prélèvement direct, dégazage d'une solution, ou à partir de l'attaque des bicarbonates qui sont dissous.

Les différentes mesures ont été reportées sur un diagramme $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_3\text{O}_3} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$.

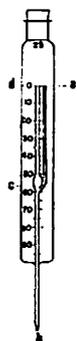


Fig. 5

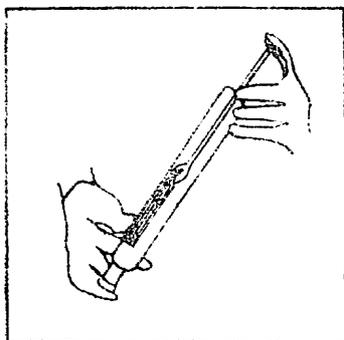


Fig. 5. — L'appareil de Karat.

Fig. 6. — Détecteur de gaz « Dräger ».

Fig. 7. — Appareil de mesure « Uni-Gas ».

Fig. 8. — Forage du Moulin du Ban à Chaudes-Aigues.

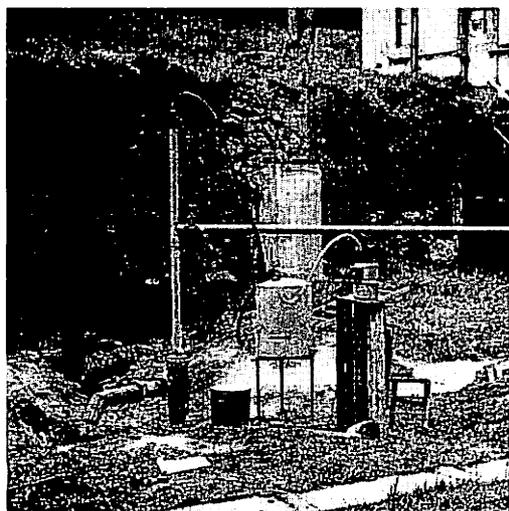
Fig. 9. — Mesure des débits d'eau et de gaz.



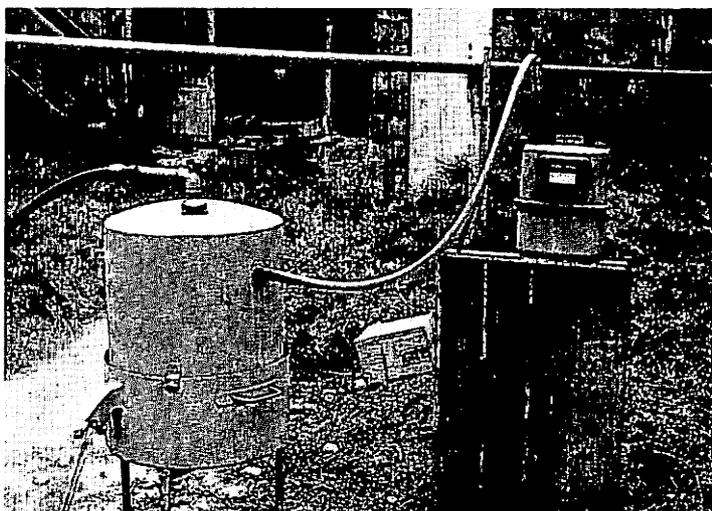
6



7



8



9

TABLEAU I
Composition chimique des gaz libres du Massif Central

SOURCES	Date analyses	CO ₂ %	N ₂ %	O ₂ %	Ar %	He ppm	H ₂	CH ₄ ppm	C ₂ H ₆ ppm	H ₂ S	Observations
St Nectaire - Gros bouillon	1978	94,6	4,7	0,2	150	50	-	0	-	-	
St Nectaire - Giraudon	1978	98,8	0,8	0,3	70	50	-	3	-	-	
Chatel-Guyon - Germaine	1978	99,5	0,2	0,1	≤ 50	≤ 50	-	13	-	-	
Chatel-Guyon - A. Aubignat	1978	98,5	0,5	0,3	125	≤ 50	-	0	-	-	
Decize St Aré (58)	1980	18,2	77,2	2,52	0,77	1,1 %	52	658	nd	-	
Royat - Eugénie	1978	99,6	0,2	0,1	≤ 50	≤ 50	-	0	-	-	
Royat - St Mart	1978	99,2	0,5	0,2	≤ 50	≤ 50	-	0	-	-	
Bellerive - Boussange (Vichy)	1979	99,5	0,18	0,03	≤ 0,002	≤ 0,002	-	0,042	-	-	
Les Aïres - La Vernière	1979	99,5	1,3	0,22	0,02	50	-	6	-	-	
La Colombière-sur-Orb	1979	81,3	15,1	3,1	0,24	200	-	73	-	-	
Lamalou Usclade 2	1979	99,5	0,8	0,16	0,01	50	-	29	-	-	
Lamalou Jaillissante 2	1979	86,8	10,5	2,6	0,11	50	-	10	-	-	
Dornas Chatelaine	1979	56,7	35,2	8,3	0,40	50	-	544	-	-	
Saint Laurent-Les-Bains	1979	11,7	86,5	0,4	1,3	0,4 %	-	0,4 %	-	-	
Meyrac-Les-Bains	1979	96,7	-	0,71	0,04	50	-	185	-	-	
Balaruc forage n° 17 (34)	1981	18,1	78,3	2,4	1,0	313	< 8	769	-	-	

SOURCES	Date analyses	CO ₂ %	N ₂ %	O ₂ %	Ar %	He %	H ₂ %	CH ₄ %	C ₂ H ₆ %	H ₂ S %	N ₂ /Ar	He/Ar
Bagnols-Les-Bains Puits : source 1	1977	5,5	93,3	0,01	1,4	-	-	0,25	-	0,0001	66,6	-
Bourbon Lancy (Lymbe) -	1978	3,4	93,0	1,1	1,2	1,9	nd	0,026	0,0001	-	77,5	1,6
Bourbon l'Archambault (trois puits)	1977	40,1	55,5	1,98	0,54	0,7	-	-	-	-	102,8	1,3
Chaudes-Aïgues Forage le Ban -	1977	89,1	10,2	0,3	0,23	-	-	0,47	0,03	-	-	-
Condillac Anastasia -	1977	99,8	0,30	0,12	0,005	0,001	0,001	0,0608	0,0015	-	60,0	-
Evaux-Les-Bains F 1 - Rocher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Magnien-Maizières (Romaine) -	1978	2,3	88,2	0,8	0,9	7,0	-	0,003	nd	-	98,8	7,8
Pougues Les Eaux (Alice) -	1978	25,2	73,1	0,4	1,1	0,7	nd	0,0725	0,0008	-	66,5	0,6
Sail-Les-Bains (du Hamel) -	1978	1,0	97,2	0,6	1,3	0,5	nd	0,001	nd	-	74,2	0,4
Saint Galmier Badoit 4 -	1978	88,6	10,8	0,1	0,2	0,07	-	0,0064	-	-	54,0	0,35
Saint-Honoré-Les-Bains (Garenne) -	1978	1,4	95,8	0,4	1,3	1,2	-	0,082	0,0004	-	73,7	0,9
Saint Père sous Vezelay Fontaines Salées -	1978	1,5	93,3	0,5	0,5	4,8	-	0,0053	nd	-	186,6	9,6
Santenay (Carnot) -	1978	2,7	88,4	0,7	0,8	7,0	-	0,0084	nd	-	110,5	8,8
Theneuille - Saint-Pardoux LD 145	1977	96,0	1,9	0,16	0,01	0,02	-	-	-	-	190,0	2,0
Air type	-	0,03	78,0	21,0	0,93	0,0005	-	-	-	-	83,9	5,37 x 10 ⁻⁴
Eau saturée d'air à 20° C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	1,44 x 10 ⁻⁴

TABLEAU II
Composition chimique des gaz dissous (en moles/litre)

SOURCES	Date ana-lyse	CO ₂ 10 ⁻³ M/L	N ₂ 10 ⁻³ M/L	O ₂ 10 ⁻³ M/L	Ar 10 ⁻³ M/L	He ppm 10 ⁻⁴ M/L	H ₂	CH ₄ ppm	C ₂ H ₆	H ₂ S	OBSERVATIONS
MASSIF CENTRAL											
Sce Moneyron - Mt Dore	1978	1,71	0,201	50,6	0,993	3,95					
Sce Félix - Mt Dore	1978	3,13	0,351	0,151	0,215	1,27					
Sce Croizat - Mt Dore	1978	1,21	1,03	0,00835	0,551	2,95					
La Bouteix	1978	5,10	0,902	0,00583	0,258	1,49					
Sce Clénence - La Bourboule	1978	3,41	5,70	0	1,03	4,61					
La Vernière	1978	2,92	0,0097	5,14	0,963	3,59					
St Jean - Mt Dore	1978	1,92	0,643	0	0,165	0,97					
Les Chanteurs - Mt Dore	1978	1,98	0,191	0,00581	0,153	0,789					
Choussy - La Bourboule	1978	1,49	6,13	1,53	1,04	7,03					

SOURCES	Date ana-lyses	CO ₂ %	N ₂ %	O ₂ %	Ar %	He ppm %	H ₂ %	CH ₄ ppm %	C ₂ H ₆ %	H ₂ S %	N/Ar	He/Ar	
PYRENEES													
Amélie - Sce Alcaline	1977	1,5	93,7	-	3,9			0,8					
Amélie - Sce Amélie	1977	3,7	90,0	-	5,7			0,4					
Amélie - Sce Fanny	1977	3,1	91,9	-	3,9			1,0					
Amélie - Sce Gros Escaladou	1977	4,0	90,1	-	4,7			1,1					
YOSGES													
Plombières - Sondage 9	1977	2,5	94,5	nd	2,7			0,1					
Plombières - Robinet Romain	1977	2,9	89,3	5,3	2,3			0,09					
Plombières - Vauquelin	1977	1,7	84,1	13,7	0,7			0,02					
Morsbronn - St Arbogast	1978	7,9	89,5	0,5	1,3	1,3	-	0,028	-	-	68,8	1,0	
Merckwiller - Pechelbronn Hélicons	1978	45,2	49,8	0,2	0,7	0,8	-	2,6	-	-	71,1	1,14	

On y définit les domaines correspondant à différentes origines du carbone (fig. 10).

Des traces d'azote et d'oxygène existent dans ces gaz, qui doivent avoir une origine atmosphérique ; infiltrés avec la pluie ces éléments sont restés dissous en profondeur et se trouvent dans les eaux à l'émergence (origine exogène).

— L'argon a une double origine, atmosphérique et radiogénique.

Le rapport N₂/Ar est souvent inférieur à celui de l'air atmosphérique dans le Massif Central (< 85 à Saint-Galmier, Thizon), traduisant un enrichissement en argon.

Ceci correspond à un enrichissement en argon 40 radiogénique et le rapport ⁴⁰A/³⁶A dépasse la valeur

de l'argon atmosphérique (298 à Clermont-Ferrand selon Thuizat en 1971) et atteint 372 à Montpensier (Puy de Dôme) par exemple.

Remarques sur les eaux carbogazeuses

Les eaux thermominérales riches en anhydride carbonique sont le plus souvent de type bicarbonaté en particulier celles de la province carbogazeuse auvergnate.

Il faut noter dans cette province les teneurs élevées en chlorures de certaines sources issues du socle cristallin (Royat, Saint-Nectaire).

Les températures les moins élevées, dans un groupe d'émergences correspondent à celles qui ont les débits gazeux les plus forts ; ceci est à mettre au compte de la détente adiabatique du CO₂.

TABLEAU III
Analyses isotopiques : Massif Central

Stations	Date	Température	³ H UT	$\delta D^{\circ}/\text{‰}$ v.s. SMOW		$\delta^{18}O^{\circ}/\text{‰}$ v.s. C.D.	$\delta^{13}C^{\circ}/\text{‰}$ v.s. PDB				Ar ⁴⁰ /Ar ³⁶	15 N v.s. N ² air
				H C O ₃	CO ₂ gaz		CO ₂ aqueux	CH ₄				
St-Diery	4.10.77	13°	39 ± 4	-59,4 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	+11,1 ± 0,2	+ 7,4 ± 0,1	- 5,2 ± 0,1		-24,0 ± 0,1	304 ± 2	-
St-Nectaire	"	40°	5 ± 2	-60,5 ± 0,5	-8,8 ± 0,1	+15,6 ± 0,2	+ 4,1 ± 0,1	- 7,0 ± 0,1		-23,9 ± 0,1	-	-
Giraudon	"	38°	< 1	-59,3 ± 0,5	-8,8 ± 0,1	+15,3 ± 0,2	+ 3,9 ± 0,1	- 6,6 ± 0,1		-28,6 ± 0,1	331 ± 2	-
Cornadore	"											
Chatelguyon	6.10.77	36°	3 ± 1	-59,0 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	+ 9,3 ± 0,2	+ 8,3 ± 0,1	- 6,9 ± 0,1		-25,1 ± 0,1	309 ± 2	-
Germaine	"	36°	4 ± 2	-58,8 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	+ 9,4 ± 0,2	+ 7,4 ± 0,1	- 6,5 ± 0,1		-24,3 ± 0,1	301 ± 2	-
Aubignat	"											
Beauregard V. Rozana	7.10.77	27°5	4 ± 2	-58,4 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	+11,0 ± 0,2	+ 7,2 ± 0,1	- 7,3 ± 0,1		-16,6 ± 0,1	305 ± 2	-
Joze	8.10.77	13°5	4 ± 2	-63,8 ± 0,5	-9,5 ± 0,1	+ 4,0 ± 0,2	+ 8,2 ± 0,1	- 5,5 ± 0,1		-16,1 ± 0,1	343 ± 2	-
Ours												
Montpensier S 16	5.10.77	43°	6 ± 2	-62,9 ± 0,5	-9,8 ± 0,1	+14,4 ± 0,2	+10,2 ± 0,1	- 5,9 ± 0,1		-18,7 ± 0,1	304 ± 2	+23,0 ± 0,2
Royat	7.10.77	33°	8 ± 2	-58,9 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	+11,1 ± 0,2	+ 6,1 ± 0,1	- 6,4 ± 0,1	-6,0	-21,2 ± 0,1	317,8 ± 2	+36,4 ± 0,2
Eugénie												
Bourbon Lancy	03.78	52°	< 1	-52,5 ± 0,5	-6,3 ± 0,1	+21,3 ± 0,2	-10,4	-16,6	-21,8	n.m	-	-
Lymbe												
Bourbon L'Ar- chambault	02.77	54°1	< 1	-52,2 ± 0,5	-6,4 ± 0,1	+17,2 ± 0,2	- 8,4	-12,4	n.m	-	-	-
Trois Puits												
Evaux Les Bains F ² - César	05.78 * 1974-Rocher	61°	*2 ± 1	-57,0 ± 0,5	-8,2 ± 0,1	+14,4 ± 0,2	- 9,2	-14,7	-18,5	-13,1 ± 0,1	-	-
Magnien-Maizières	05.78	16°3	< 1	n.m	n.m	+19,2 ± 0,2	-11,0 ± 0,1	-19,8 ± 0,1	-21,4 ± 0,1	n.m	-	-
Pougues les Eaux Alice	05.78	13°1	-	-	-	-11,0 ± 0,2	- 4,3	-12,9 ± 0,1	-13,9	-18,2 ± 0,1	-	-
Saint-Honoré Les Bains. Garenne	04.78	29°6	< 1	-51,4 ± 0,5	-7,4 ± 0,1	+ 4,6 ± 0,2	-14,6 ± 0,1	-23,2 ± 0,1	-22,0	n.m	-	-
Saint Père sous Vezelay	04.78	11°0	88 ± 7	n.m	n.m	+20,4 ± 0,2	-11,5 ± 0,1	-20,4 ± 0,1	-20,9 ± 0,1	n.m	-	-
Fontaines salées												
Sail les Bains du Hamel	03.78	28°0	4 ± 1	-56,6 ± 0,5	-8,5 ± 0,1	+12,0 ± 0,2	- 9,9 ± 0,1	-18,5 ± 0,1	-21,3 ± 0,1	-26,9 ± 0,1	-	-
Santenay Lithium	04.78	17°0	3 ± 1	n.m	n.m	+14,7 ± 0,2	-10,8 ± 0,1	-19,4 ± 0,1	-20,7 ± 0,1	n.m	-	-
Theneuille (St Pardoux) LD 145	01.77	12°8	-	-	-	-	- 3,2	- 7,3	- 8,8	-26,0 ± 0,1	-	-
Thizon Source n° 1	06.77	11°0	14 ± 3	-	-	+ 7,9 ± 0,2	+ 3,5	- 8,0	n.m	-20,0 ± 0,1	-	-

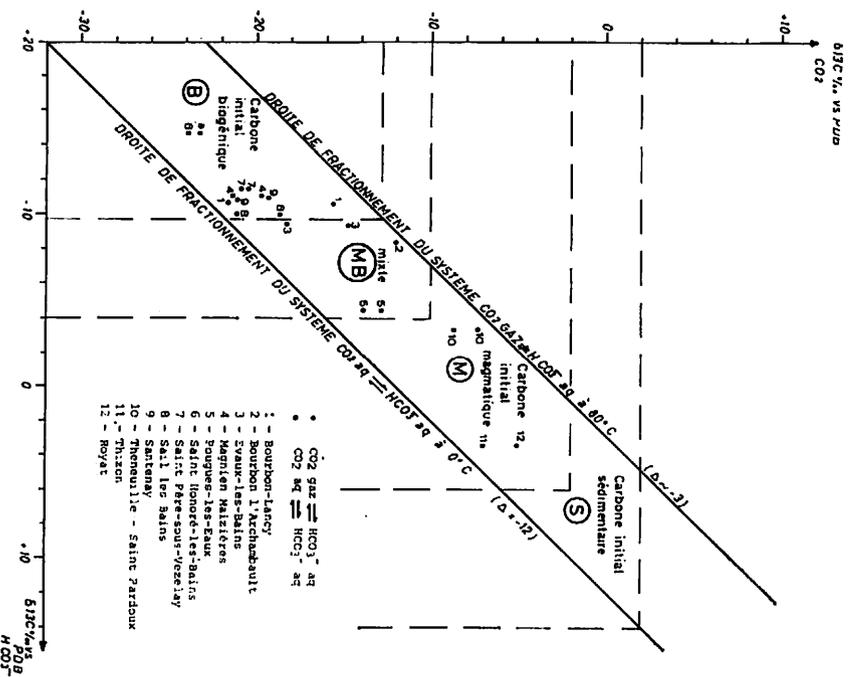


Fig. 10. — Diagramme du système carbonique CO₂ - HCO₃⁻.

LES SOURCES AZOTÉES

Les dégagements gazeux où prédomine l'azote sont dans l'ensemble plus discrets que les précédents.

Principales caractéristiques

Les teneurs en azote dépassent 90 p. cent dans de nombreux cas : dans le Massif Central français, à Bagnoles, Bourbon-Lancy, Sail, Saint-Honoré, dans les Vosges, à Plombières et dans les Pyrénées, à Amélie-les-Bains (fig. 3).

L'anhydride carbonique est présent, de l'ordre de quelques pour cent et la composition isotopique $\delta^{13}\text{C}$ du CO₂ varie de — 12,4 (Bourbon-l'Archambault - Allier) à — 19,8 (Magnien-Maizières - Côte d'Or), indiquant une origine biogénique pour le carbone du CO₂ (origine exogène) tableaux IV et V).

Ces gaz présentent souvent des teneurs en hélium élevées, pouvant dépasser 1 p. cent.

Une zone à fortes teneurs en hélium, en bordure du Morvan (de Bourbon-Lancy à Santenay) correspond au contact du socle avec les terrains sédimentaires.

De fortes teneurs en hélium existent aussi en bordure du fossé rhénan, à Morsbronn et à Merckwiller-Pechelbronn (source des Héllions).

Des débits gazeux ont été mesurés et la production d'hélium a été calculée dans un certain nombre de cas.

Elle atteint 2,1 litres/h à Magnien-Maizières, pour un débit de gaz total de 30 litres/h, 0,76 litre/h à Evaux, pour un débit de gaz total de 33,3 litres/h, 3,21 litres/h à Nérils-les-Bains et 2,8 litres/h à Balaruc.

Remarquons ici que, du fait des débits gazeux très supérieurs des sources carbogazeuses, on peut obtenir dans certains cas, en dépit des faibles teneurs en He des débits non négligeables de ce gaz rare ; ainsi à Saint-Galmier (Loire) on a 7,56 litres/h d'He, pour un débit de gaz total de 10 800 litres/h et à Saint-Alban (Loire) on a 6,3 litres/h d'He.

Ces dégagements d'hélium, dus à la désintégration radioactive dans les minerais d'uranium et de thorium accompagnent des eaux thermominérales dans leur remontée à la faveur de failles ; les teneurs élevées en He de certaines sources indiquent vraisemblablement qu'il existe des accu-

TABLEAU IV Analyse isotopique : Amélie-les-Bains, Pyrénées

PRELEVEMENTS	DATE	Temp. °C	³ H UT	δD°/‰	δ ¹⁸ O°/‰	δ ³⁴ S°/‰	δ ¹³ C°/‰ v.s. P.D.B.		⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar		15 N v.s. N ² air
				v.s. S.M.O.W.	v.s. C.D. ± 0,2	HCO ₃ ⁻	CO ₂ dissous	CH ₄ dissous	Argon dissous		
S(-II) S(+VI)											
Eaux de surface :											
Le Tech à la Preste	1.5.77	7	65±6	-59,9 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-	+ 9,3	-6,0 ± 0,1	-	-	-
Le Mondony à Montalba	2.5.77	10	62±6	-47,7 ± 0,5	-7,5 ± 0,1	-	+ 9,3	-10,4 ± 0,1	-	-	-
Sources froides :											
La Preste											
Source Reuter	1.5.77	11	70±6	-53,9 ± 0,5	-8,1 ± 0,1	-	+ 8,3	-11,0 ± 0,1	-	-	294
Amélie - Galerie											
Parès (eaux froides)	29.4.77	32	30±4	-50,3 ± 0,5	-7,5 ± 0,1	-	-	-	-	-	n.d.
Sources thermales											
Amélie											
- Alcaline	28.4.77	56	2±1	-61,3 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	-4,5	+ 8,9	-9,3 ± 0,1	n.d.	n.d.	280
- Amélie	30.4.77	61	3±1	-61,4 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-3,4	+17,0	-9,4 ± 0,1	-18,2 ± 0,1	-27,3 ± 0,1	295
- Anglada	25.4.77	57	≤ 1	-61,1 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	-3,6	+18,5	-9,3 ± 0,1	n.d.	n.d.	294
- Arago	26.4.77	57	3±1	-60,9 ± 0,5	-9,3 ± 0,1	-3,8	+19,2	-9,6 ± 0,1	-20,0 ± 0,1	-27,5 ± 0,1	291
- Ascensionnelle	25.4.77	51	≤ 1	-60,7 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-4,3	+19,1	-9,7 ± 0,1	n.d.	n.d.	319
- Chomet	25.4.77	46	≤ 1	-50,9 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	-3,7	+19,1	-10,5 ± 0,1	n.d.	n.d.	292
- Concorde	29.4.77	59	≤ 1	-60,7 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	-4,3	+19,2	-9,5 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.
- Galerie	25.4.77	52	≤ 1	-61,0 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	-4,0	+18,6	-10,0 ± 0,1	n.d.	n.d.	305
- En Côte	28.4.77	56	≤ 1	-60,8 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	-3,8	+16,3	-9,5 ± 0,1	n.d.	n.d.	284
- Fanny	27.4.77	62	≤ 1	-61,0 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	-2,9	+17,5	-9,6 ± 0,1	-20,3 ± 0,1	-29,2 ± 0,1	290
- Parès	28.4.77	56	≤ 1	-60,7 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-4,0	+19,0	-9,6 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.
- Pascalone	30.4.77	50	≤ 1	-61,2 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-4,5	+19,6	-9,8 ± 0,1	n.d.	n.d.	311
- Petit Escaladou	28.4.77	57±5	≤ 1	-60,8 ± 0,5	-9,2 ± 0,1	-4,2	+18,5	-9,5 ± 0,1	n.d.	-27,2 ± 0,1	300
- Petit Monjolet	27.4.77	59	3±1	-61,0 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	-3,6	+18,0	-9,7 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.
- La Rénale	03.5.77	32	2±1	-61,3 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	-3,8	+15,6	-9,6 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.
- Gros escaladou	03.5.77	62	≤ 1	-60,2 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	-4,5	+18,1	-9,9 ± 0,1	-21,8 ± 0,1	-27,4 ± 0,1	294
La Preste											
- Appolon	01.5.77	43±5	≤ 1	-68,0 ± 0,5	-10,1 ± 0,1	-	+ 6,7	-9,9 ± 0,1	-	-	n.d.
Précipitations											
- Amélie Can Malcion	28 au 29.4.77	-	41±4	-26,6 ± 0,5	-4,4 ± 0,1	-	-	-	-	-	-
- Amélie Can Malcion	3 au 4.5.77	-	49±5	-43,1 ± 0,5	-6,2 ± 0,1	-	-	-	-	-	-

TABLEAU V Analyse isotopique : Plombières-les-Bains, Vosges

PRELEVEMENTS	DATE	Temp. °C	³ H UT	δD°/‰	δ ¹⁸ O°/‰	δ ³⁴ S°/‰	δ ¹³ C°/‰ v.s. P.D.B.		⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar		15 N v.s. N ² air
				v.s. S.M.O.W.	v.s. C.D. ± 0,2	HCO ₃ ⁻	CO ₂ dissous	CH ₄ dissous	Argon dissous		
Sondage 9	13.6.77	71	≤ 1	-59,7 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	+11,8 ± 0,2	-13,4 ± 0,1	-22,9 ± 0,1	-25,2 ± 0,1	297	
Robinet romain	13.6.77	70	≤ 1	-60,0 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	+11,7 ± 0,2	-13,6 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
Stanislas	13.6.77	64	≤ 1	-59,8 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	+10,7 ± 0,2	-14,1 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
Savonneuse n° 9	14.6.77	47	22±3	-58,7 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	+11,8 ± 0,2	-16,0 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
Jutier	14.6.77	33±5	103±8	-59,2 ± 0,5	-8,7 ± 0,1	+10,8 ± 0,2	-19,3 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
Vauquelin	14.6.77	70	≤ 1	-50,2 ± 0,5	-9,0 ± 0,1	+11,6 ± 0,2	-13,8 ± 0,1	-25,2 ± 0,1	-26,9 ± 0,1	293	
Ste Catherine	14.6.77	63	3±1	-59,7 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	+11,5 ± 0,2	-14,1 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
L'Augronne 1	15.6.77	11	247±16	-60,8 ± 0,5	-9,1 ± 0,1	+ 8,8 ± 0,2	-25,5 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
L'Augronne 2	15.6.77	11	268±16	-60,5 ± 0,5	-8,9 ± 0,1	+ 6,7 ± 0,2	-24,9 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	
Alliot	20.7.77	9±4	40±4	-58,0 ± 0,5	-8,5 ± 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	

mulations de gaz, soit dans le socle même, soit dans des réservoirs sédimentaires proches.

L'analyse factorielle indiquerait une origine essentiellement atmosphérique pour l'azote et l'argon associés aux sources azotées.

Remarques sur les sources azotées

Les eaux qui accompagnent les dégagements gazeux où prédomine l'azote ont souvent un faciès chloruré sodique.

Certaines sources azotées se caractérisent par la présence d'acide sulfhydrique gazeux à l'émergence. Les teneurs en H₂S, qui est alors associé à des espèces réduites du soufre, restent en général très faibles par rapport aux autres gaz. Ceci est le cas d'Amélie-les-Bains dans les Pyrénées-Orientales où des traces d'H₂S confèrent à l'eau thermominérale de cette station le label sulfuré.

CONCLUSIONS

Il existe, en France en particulier, deux catégories principales de gaz associés aux sources thermominérales.

— Les dégagements à anhydride carbonique prédominant correspondent à des débits gazeux élevés.

Ils résultent de phénomènes géologiques profonds, dégazage du manteau ou métamorphisme, et ils participent à l'acquisition des caractéristiques d'eaux thermominérales qu'ils contribuent à faire émerger à proximité d'accidents majeurs.

— Les dégagements d'azote prédominant sont plus discrets.

Des gaz rares y atteignent des teneurs élevées.

L'azote et l'argon sont pour l'essentiel d'origine atmosphérique alors que l'hélium est d'origine radiogénique.

Ces gaz sont véhiculés par des circulations d'eaux thermominérales qui remontent à la surface à la faveur de failles.

— Des mélanges de ces deux pôles gazeux se rencontrent dans un certain nombre de sources, comme le montrent leurs caractéristiques chimiques et isotopiques intermédiaires (Bourbon-l'Archambault, Evaux-les-Bains, Pougues-les-Eaux).

BIBLIOGRAPHIE

- Armand L. — Etude des sources gazeuses et particulièrement des sources obtenues par forage dans le Bassin de Vichy, *Ann. IHC*, 1934, 9.
- Batard F., Billet C., Risler J.J. — Prospection de CO₂ d'origine profonde dans le Massif Central français. *Bulletin du BRGM. Section III, n° 2*, 1979, 157-164.
- Batard F., Bosch B., Degranges P., Leleu M., Marce A., Risler J.J. — Les gaz rares, une caractéristique des sources thermominérales du Massif Central français. *CRAS*, 1979, 288, *Série D*, 811.
- Batard F., Bosch B., Marce A., Risler J.J. — Détermination de l'origine du carbone par l'étude isotopique du système CO₂-HCO₃ dans les sources thermominérales du Massif Central français. 1980.
- Baubron J.C., Bosch B., Degranges P., Halfon J., Leleu M., Marce A., Sarcia C. — Recherches géochimiques sur les eaux thermales d'Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientales) et de Plombières-les-Bains (Vosges). *AEA, Int. Symp. Isotope Hydrology*, 1978.
- Baubron J.C., Bosch B., Degranges P., Leleu M., Marce A., Risler J.J., Sarcia C. — Recherches géochimiques sur les eaux thermales de la bordure Ouest de la Limagne. *Bull. Minéral*, 1979, 102, 676-683.
- Baubron J.C., Bosch B., Degranges P., Pepin D., Risler J.J. — Etude chimique et isotopique de l'eau minérale et des gaz thermaux de Royat (P.-de-D.). *Cahiers d'Artério. de Royat*, 1978, 6, 14-25.
- Baubron J.C., Bosch B., Halfon J., Marce A., Risler J.J. — *Essai de caractérisation des gaz dissous dans les eaux thermominérales par analyse isotopique de l'argon, du gaz carbonique et du méthane*. Rennes, Sciences de la Terre, 1977.
- Bosch B., Marce A., Risler J.J. — *Identification chimique et isotopique des principales sources thermominérales des Vosges et du Massif Central français*. Rennes, Sciences de la Terre, 1977.
- Castagne R. — Nouvelles recherches sur les dégagements gazeux du Languedoc méditerranéen ; les Bouillens (Gard). *Ann. IHC*, 1932.
- Chaigneau M., Aubignat A. — Sur les gaz de la source « César » de Néris-les-Bains (Allier) et leur teneur en hélium. *Ann. Phar. fr.*, 1967, 25, 645-647.
- Craig H. — *The geochemistry of the stable carbon isotopes*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. London, Pergamon Press, 1953, 53-92.
- Degranges P., Leleu M. — Etude des gaz dissous dans les eaux thermominérales. Le cas des eaux de la région du Mont-Dore. *CRAS*, 1980, T 290, *série D*, 295.
- Elskens I., Tazieff H., Tonani F. — Investigations nouvelles sur les gaz volcaniques. *Bull. volcanol.*, 1969, 32.
- Fontes J.C., Glangeaud L., Gonfiantini R., Tongiorgi E. — Composition isotopique et origine des eaux et gaz thermaux du Massif Central. *CRAS*, 1963.
- Fricke K. — ¹³C/¹²C - Untersuchungen des CO₂ - Gases einer Mofette in Ost-Westfalen sowie Vergleiche mit anderen ¹³C/¹²C - Daten in Europa. *Fachz. Deuts. Mineralbrun*, 1979, 1/5-4-6.
- Lopoukhine M. — L'échantillonnage des fumerolles et les analyses de gaz sur le terrain, *rapport BRGM 70 SGN 245 GTM*.
- Maisonneuve J., Risler J.J. — Le gaz carbonique hydrothermal en Auvergne. *Rev. Sc. Nat. d'Auvergne*, 1974, 40, 27-47.
- Maisonneuve J., Risler J.J. — La ceinture péri-alpine « carbo-gazeuse » de l'Europe occidentale. *Bulletin du BRGM (deuxième série) section III*, 1979, 2, 109-120.
- Moureu Ch., Lepape A. — Les gaz rares des sources thermales. *Ann. IHC*, 1925.
- Moureu Ch. — Les gaz rares des gaz naturels. *J. chem. soc.*, 1923, 123, London.
- Pilot J. — *Les isotopes en géologie*. Paris, Doin, 1974.
- Risler J.J. — Point des travaux d'analyses chimique et isotopique réalisés sur les eaux thermominérales du Massif Central français. *Rapport BRGM 76 SGN 450 MCE*, 1976.
- Risler J.J. — Bassin thermominéral de Vichy (Allier). Recaptage par forage de la source « Boussange » à Bellerive. *BRGM Service Géologique Régional Alsace*.
- Stahl W., Diederich G. — C - Isotopenanalysen des Methans und Kohlen-dioxids einer hessischer Mineralwässer Notizbl - hess 1 - *Amt. Bodenforsch*, 1975, 103, 305-313.
- Thulzat R. — *Les sources thermominérales de Châtelguyon (I), Etude de la constitution isotopique de l'argon contenu dans les gaz d'accompagnement de certaines sources minérales du Puy-de-Dôme, de l'Allier, du Cantal et de la Creuse (II)*. Thèse, Clermont-Ferrand, 1973.

Quelques données récentes sur la radioactivité naturelle des sources hydrominérales françaises

M.-L. REMY, P. PELLERIN *
(Le Vésinet)

En France il y a 1 400 sources minérales dont environ 1 000 exploitées. A part les travaux anciens et partiels de Lepape vers 1924, ces sources n'avaient jamais fait l'objet d'études d'ensemble sur le plan de la radioactivité [1]. A l'époque, la distinction entre ce qui revenait au radium et au radon n'était pas toujours clairement faite, ce qui retire évidemment une partie de leur intérêt aux résultats qui ont été publiés alors.

Aussi dès 1962, avec l'aide du Dr Ninard (je tiens à le remercier ici) qui faisait effectuer des prélèvements dans des conditions rigoureuses, le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) amorçait-il une étude systématique de la radioactivité, mais cette fois avec des moyens modernes [2].

En 1968 fut ainsi publié un premier rapport sur la radioactivité naturelle de 250 sources hydrominérales françaises [3]. Ce travail a été activement poursuivi et, à présent, l'étude de près de 700 sources est achevée, et les résultats complets vont en être prochainement publiés aux Annales des Mines. Dans mon exposé, qui ne peut qu'être très général, je ne donnerai que les grandes lignes de ce travail.

Si l'on contrôle la radioactivité des eaux minérales, c'est bien pour éviter de donner à la consommation des eaux qui, éventuellement, pourraient présenter un risque pour l'hygiène publique [4]. Je m'empresse de vous rassurer : ce risque est inexistant, dans notre pays tout au moins, comme nous allons le voir.

* Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants, B.P. n° 35, 78110 LE VÉSINET.

TABLEAU I. — Exposition naturelle aux rayonnements.

Origine de l'exposition naturelle	Dose annuelle
Rayonnement cosmique	30 millirads
Rayonnement tellurique	30 millirads
Radioéléments du corps humain (Radium, Carbone 14, Potassium 40, etc.)	30 millirads
Divers	10 millirads (dont 1 à 2 des sources hydrominérales)
TOTAL	100 millirads

A titre de comparaison, je rappelle d'abord quelles sont les causes et l'importance des expositions de l'homme aux rayonnements et à la radioactivité. Comme référence, nous prendrons l'exposition naturelle, inévitable, qui est très importante (tableau I) : elle donne en effet en moyenne 100 millirads par an à chacun de nous, à l'altitude 0 de la mer, avec des variations quelquefois considérables, jusqu'à 500 et 1 000 p. cent, par exemple, dans certaines régions montagneuses (Massif Central, Vosges, etc.).

Cette exposition naturelle a trois origines, qui en représentent chacune à peu près le tiers :

- l'exposition aux rayons cosmiques,
- l'exposition aux radioéléments qui sont contenus dans le sol, dans les matériaux de construction, dans l'air que nous respirons (qui contient du radon), etc.,
- enfin l'exposition aux radioéléments que contient notre propre organisme.

TABLEAU II. — Total des expositions naturelles et artificielles.

Nature de l'exposition de l'homme	Dose annuelle
Rayonnements naturels	100 millirads
Rayonnements médicaux (radiologie)	100 millirads
Peintures radioluminescentes + TV	5 millirads
Retombées tests militaires atmosphériques	1 à 2 millirads
Centrales nucléaires et retraitement	< 1 millirad
Total de l'exposition annuelle de l'homme	206 à 208 millirads en moyenne

Le potassium 40 de notre organisme, notamment, y entraîne à lui seul en moyenne 200 000 désintégrations radioactives chaque minute. Son rayonnement gamma est très pénétrant et simplement du fait que nous soyons ici réunis, je dois vous prévenir que notre exposition à ce rayonnement va se trouver doublée pendant la durée de notre congrès... car nous nous irradiions ainsi les uns les autres !

Viennent ensuite les expositions artificielles dont la plus importante est liée aux rayonnements utilisés en médecine, les rayons X et la radiologie (tableau II). Nous allons les comparer par ordre décroissant d'importance, aux 100 millirads de l'exposition naturelle :

Chaque année chacun de nous reçoit de la radiologie médicale en moyenne 100 millirads (ce qui correspond à peu près à la dose délivrée par une radiographie pulmonaire par personne).

On tombe ensuite beaucoup plus bas avec les peintures radioluminescentes (les montres lumineuses) et l'exposition due à la télévision (les postes en couleur font usage de très hautes tensions — jusqu'à 25 000 volts), ce qui distribue à la population en moyenne 5 millirads de plus chaque année.

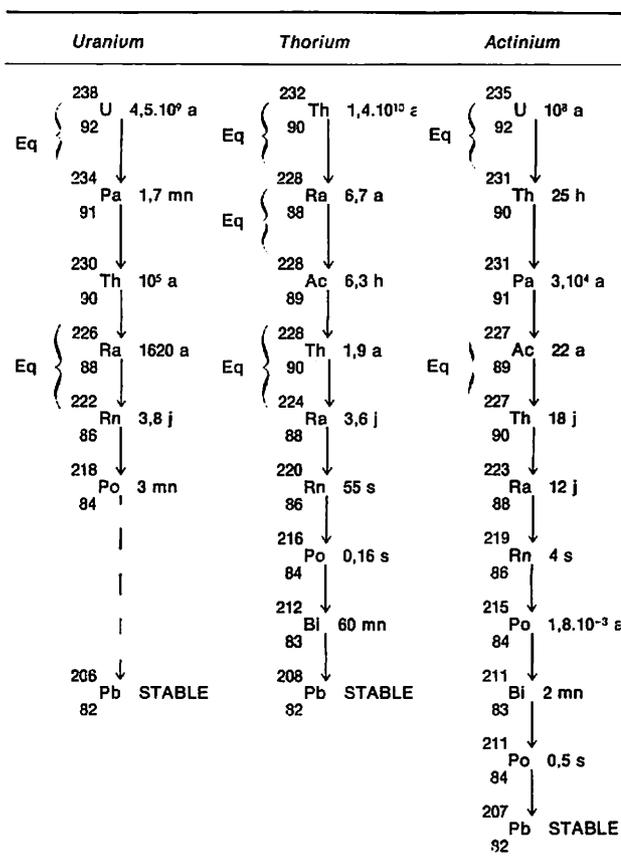
Puis les retombées militaires atmosphériques, notamment celles qui proviennent des explosions russo-américaines de 1961-64, et qui nous donnent encore un à deux millirads de plus par an.

Enfin toute l'industrie nucléaire (les centrales nucléaires et le retraitement) en l'an 2 000 ne donnera pas une exposition atteignant 1 millirad par an.

Au total l'exposition annuelle moyenne de l'homme est de 206 à 208 millirads, dont 200, la quasi-totalité, sont par conséquent dus à l'exposition naturelle et à la radiologie médicale.

L'exposition due aux sources hydrominérales se range donc dans l'exposition naturelle. La dose moyenne correspondante n'est pas chiffrée d'une façon tout à fait précise pour les sources minérales mais elle est certainement inférieure à deux millirads par an en France.

TABLEAU III. — Les trois familles radioactives naturelles.



Eq : équilibre possible.

La première question à poser à leur sujet est de savoir quelles sont les substances radioactives naturelles que l'on peut y trouver : elles appartiennent essentiellement à trois familles, l'uranium, le thorium et l'actinium (tableau III). L'uranium 238 constitue en poids l'essentiel de l'uranium naturel, le plus répandu, et cette famille comporte des périodes très diverses (celle de l'uranium 238 est de 4 milliards et demi d'années, celle de son descendant le protactinium de 1,7 minute seulement, ensuite vient le thorium 230 avec 100 000 ans de période, etc.). (Je vous rappelle que la période radioactive est le temps au bout duquel la moitié des atomes présents de ce radioélément s'est désintégrée.)

Dans cette filiation de substances radioactives qui se désintègrent les unes après les autres dans leurs descendants successifs, certaines peuvent être « en équilibre » entre elles. Pour qu'il y ait équilibre entre deux éléments d'une filiation, il faut réunir trois conditions :

- que le « descendant » soit lui-même radioactif ;
- que la période du « descendant » soit très courte par rapport à celle de « l'ancêtre », ce qui

est le cas pour le radium (1 620 ans de période) et le radon (3,8 jours) ;

— que les deux substances, « l'ancêtre » et le « descendant », restent ensemble dans le même espace.

Cette famille de l'uranium aboutit finalement au plomb stable, le plomb 206, dernier descendant qui n'est pas radioactif, et la filiation s'arrête là.

La famille du thorium 232 présente une filiation comparable qui aboutit à un autre plomb stable, le plomb 208.

Enfin, la famille de l'actinium (c'est la famille de l'uranium 235, qui est le seul fissile des uranium naturels et se présente comme une impureté de l'uranium 238) aboutit à un 3^e plomb stable aussi, le plomb 207.

Les mesures que nous avons pratiquées sur ces sources minérales sont les suivantes (tableau IV) :

- la radioactivité volumique bêta totale ;
- la teneur en uranium naturel [5] ;
- la radioactivité du radium 226 ;
- la teneur en thorium naturel ;
- l'activité du radon 222 ;
- le potassium chimique (car vous savez que 1 sur 10 000 atomes de potassium chimique, l'isotope 40, est radioactif. C'est d'ailleurs lui qui est responsable des 200 000 désintégrations que chacun de nous comporte à chaque minute).

Parallèlement, nous avons confirmé par la mesure dans nos laboratoires, sur les mêmes prélèvements :

- la résistivité ;

TABLEAU IV. — Mesures effectuées au SCPRI.

Radioactivité	Expression
Activité volumique bêta totale	Picocuries/litre
Teneur en Uranium naturel	Microgrammes/litre
Activité du Radium 226	Picocuries/litre
Teneur en Thorium naturel	Microgrammes/litre
Teneur en Potassium	Milligrammes/litre
Activité du Radon 222	Nanocuries/litre
Autres mesures	
Résistivité	Ohms/cm
Extrait sec	Milligrammes/litre
Teneur en Sodium	" "
Teneur en Calcium	" "

- le poids d'extrait sec ;
- la teneur en sodium ;
- la teneur en calcium.

A titre d'illustration immédiate le tableau V donne les résultats correspondants à la ville de Luchon : vous voyez que l'on ne peut vraiment pas dire que les eaux de Luchon soient des eaux extrêmement radioactives. Elles sont cependant caractérisées par l'existence d'une quantité de radon par litre assez importante si on la compare à la quantité de radium présente. On s'aperçoit ainsi qu'il existe à Luchon un *déséquilibre* entre le radium présent dans les eaux (moins de 1 picurie par litre), et le radon que l'on mesure à l'émergence (plusieurs nanocuries par litre), teneur beaucoup plus élevée

TABLEAU V. — Bagnères-de-Luchon : prélèvements du 4 août 1975.

Nom de la source	Débit moyen (l/mn)	Utilisation *	Résistivité (Ω. cm)	K (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Act. vol. β totale (pCi/l)	U Nat (μg/l)	Radium 226 (pCi/l)	Thorium Nat (μg/l)
Blanche 1 et 2	11,8	I E	2 100	4,4	60	11	< 4,7	< 0,6	< 1	< 9
Bordeu	50	E	2 000	4,7	66	13	< 6,7	< 0,6	< 1	< 8
Burgalat	2	E	2 400	4,2	51	14	< 6,7	< 0,7	< 1	< 8
Etigny	2,4	E	2 100	4,5	66	7,6	< 4,7	< 0,6	< 1	< 11
Grotte inférieure	3,2	I	1 600	6,0	84	12	< 6,7	< 0,6	< 1	< 8
Moureu Radio	3,5	I	—	3,0	9,7	37	8,5	1,6	1,5	< 13
Le Pape 1 et 2	17,4	E	2 700	3,3	16	37	< 6,7	3,7	1,4	< 8
Pré 1	6,3	I	1 700	5,3	90	3,3	< 6,8	< 0,7	< 1	< 8
Pré 2	0,5	I	1 700	5,3	91	3,6	< 6,7	< 0,7	< 1	< 9
Pré 3	1,8	I	1 800	5,1	90	5,3	< 6,7	< 0,6	< 1	< 7
Reine Bayen	46,2	I E	1 900	4,5	77	8,4	< 6,8	< 0,7	< 1	< 8
Richard Nouvelle	31,6	I	2 000	4,8	68	12	< 4,7	< 0,6	< 1	< 8
Romains 1 et 2	2,3	I	1 800	6,0	78	6,4	< 6,7	< 0,6	< 1	< 8

* I : usage interne. E : usage externe.

TABLEAU VI. — *Mesure du Radon dans les eaux de Bagnères-de-Luchon.*

Divisions	Lieu de prélèvement appellation	Teneur en radon dans l'eau en nCi/l
Eau de Boisson	Buvette (à 8 h 30)	
	Pré 1	0,9
	Pré 2	0,7
	Pré 3	1
	Ravi	0,2
	Moureu	19
Eau des Bains	<i>Bains radioactifs</i>	
	Eau du Réservoir	3
	<i>Eau dans une baignoire</i> (conditions normales)	2,5
	<i>Bains Bordeu</i>	
	Bordeu pur (eau chaude)	1,6
	<i>Saline froide</i> (mélange des eaux du canal hydro- statique et la galerie François) ..	8
	<i>Bain mélange</i> (conditions normales)	3,6
Sources	<i>A l'émergence</i>	
	Lepape I	37
	Lepape II	42

TABLEAU VII. — *Radioactivité des onze principales sources françaises hydrominérales de table.*

Dépt	Source	K mg/l	U Nat µg/l	Ra 226 pCi/l	Th Nat µg/l	Millions de litres par an pour 1979 *
74	Evian (Cachat)	1,0	1,5	< 1	< 11	720
88	Contrexéville	2,6	0,6	< 1	< 11	700
88	Vittel (Hépar- Gde Source)	2,5	1,1	< 1	< 11	540
30	Perrier	3,4	3,4	< 1	< 11	130
03	Saint-Yorre (13 sources)	120	1,3	12	< 11	110
42	Saint-Galmier (Badoit)	16	79	2,1	< 11	75
63	Saint-Sylvestre	120	1,4	10	< 11	56
03	Vichy (3 sources)	100	0,35	17	< 11	43
22	Plancoet (Sassay)	2,5	< 0,6	< 1	< 11	15
63	Châteauneuf- les-Bains	44	< 0,6	26	< 11	6
07	Vals (4 sources)	40	< 0,6	2,2	< 11	6

* Compte non tenu des exportations.

que ne l'explique la teneur de cette eau en radium. Ce déséquilibre est donc à l'avantage du radon.

Si l'équilibre normal entre radium et radon est ainsi rompu dans ces eaux c'est qu'elles ont été en contact avec du radium dans les roches profondes, mais que ce radium est sous une forme peu soluble ; seul le radon est alors entraîné par l'eau (tableau VI) [6, 7]. A Luchon, l'ancêtre (radium 226) et le descendant (radon 222) ne restent donc pas dans le même espace, le radon étant dissous puis entraîné par les eaux alors que le radium reste retenu dans les roches profondes, et il n'y a plus d'équilibre radium-radon à l'émergence.

Je vais maintenant vous dire quelques mots de l'ensemble des mesures que nous avons faites, mais comme je ne peux pas vous présenter ici les résultats des 700 sources, je me limiterai à la radioactivité des 11 principales sources hydrominérales de table qui sont vendues en France (tableau VII). D'une façon générale, la radioactivité des eaux françaises n'est pas considérable. L'eau la plus radioactive en radium est celle de Châteauneuf-les-Bains avec 26 picocuries par litre, ce qui est encore très faible puisque la concentration maximale admissible retenue par la Commission Internationale de Protection Radiologique pour l'eau potable est de 230 picocuries par litre. Vous voyez

qu'on se situe à peu près au 10^e de cette limite maximale admissible. Les sources de Vichy ont aussi une radioactivité en radium relativement élevée, en particulier Vichy Saint-Yorre et trois autres sources. Pour les autres, la teneur en radium reste faible.

Une autre eau remarquable est celle de la source Saint-Galmier Badoit sur le plan, cette fois, de la teneur en uranium. Elle est de 79 microgrammes par litre, alors que pour toutes les autres sources la teneur en uranium est beaucoup plus faible. Cette teneur n'est absolument pas dangereuse car la concentration maximale admissible pour l'uranium (qui est d'ailleurs déterminée par la toxicité chimique) est plus de 20 fois plus élevée que la teneur effective de l'eau de Badoit.

Les consommations correspondantes sont de même indiquées en chiffres arrondis : ce sont les eaux d'Evian et de Contrexéville qui sont les plus consommées avec 720 et 700 millions de litres par an. Comme la France compte à peu près 50 millions d'habitants, chacun boit en moyenne 28 litres par an de ces eaux.

Les chiffres les plus élevés en potassium 40, qui je vous le rappelle est radioactif, naturel et inévitable, sont ceux des sources de Saint-Yorre et Saint-Sylvestre avec 120 milligrammes par litre de potassium.

La teneur en potassium de l'organisme est soumise à une homéostasie très rigoureuse. La charge en potassium chimique de l'organisme humain standard (75 kg) est de 140 grammes, soit 0,20 p. cent du poids de l'organisme. Cette teneur est constante : toute variation de la teneur en potassium sur le plan physiologique entraînerait en effet des désordres immédiatement graves et c'est l'un des constituants physico-chimiques de l'organisme parmi les mieux régulés. Donc, quel que soit l'apport de l'alimentation en potassium à l'organisme, s'il y a un excédent par rapport à cette teneur précise, une élimination rénale sera immédiatement déclenchée. Par conséquent, l'on peut dire que l'exposition interne naturelle la plus importante, due au potassium 40 (c'est-à-dire les 200 000 désintégrations par minute pour un homme standard), est absolument constante, quelle que soit la quantité de potassium ingérée.

Le thorium quant à lui reste toujours inférieur à 11 microgrammes par litre, qui est la limite que nous nous sommes fixés pour nos mesures.

Quant à l'exposition externe aux rayonnements, due aux sources hydrominérales non consommées, à usage de bains, boues, etc., elle est toujours beaucoup plus faible que l'exposition correspondante pour les bains de mer. En effet, la mer contient 400 milligrammes par litre de potassium, soit à peu près 400 picocuries de potassium 40 par litre (soit l'équivalent en activité d'une petite bombe de téléthérapie par kilomètre cube d'eau de mer !).

CONCLUSION

Le risque radioactif dû à la consommation d'eaux de sources hydrominérales est donc nul, dans notre pays tout au moins. La radioactivité des eaux minérales n'est absolument pas significative sur le plan de la santé Elle est d'ailleurs, en activité totale, toujours inférieure au moins d'un facteur 10 à la radioactivité de l'eau de mer.

Il faut souligner qu'aucun travail sérieux n'a jamais établi de relation entre la présence d'un peu de radium dans les eaux de boisson, même aux taux un peu plus élevés qu'on trouve parfois en France, et un accroissement quelconque de la fréquence des cancers ou des leucémies dans quelque région que ce soit [8, 9, 10].

Jamais d'ailleurs, dans le monde entier, on n'a relevé de publication médicale sérieuse prouvant qu'il y aurait une action cancérigène quelconque des sources hydrominérales, même beaucoup plus radioactives que celles de notre pays.

En tout cas, si des hypothèses sont parfois faites par certains à partir de considérations purement théoriques, statistiques, et systématiquement pessimistes, elles n'ont jamais été confirmées par aucune observation clinique sérieuse.

ANNEXE

Quelques chiffres et données sur l'exposition aux rayonnements et à la radioactivité naturels

- L'eau de l'ensemble des mers du globe terrestre contient une radioactivité totale de 500 milliards de curies, pour le seul potassium 40.

- Le sol français, sur un mètre de profondeur, contient :

- environ 1 million de curies de potassium 40 ;
- 300 000 curies d'uranium naturel ;
- 400 000 curies de thorium naturel.

- On relève des expositions annuelles de 1 600 millirads au Brésil et 1 800 millirads en Forêt Noire.

- Il suffit de s'élever de 25 mètres, soit de la hauteur d'un immeuble de sept étages, pour que l'exposition annuelle aux rayons cosmiques augmente d'un millirad.

- A l'altitude des vols supersoniques, l'exposition aux rayonnements cosmiques est de 14 000 millirads par an en moyenne, et peut atteindre des valeurs de plusieurs rads par heure lors des éruptions solaires.

Composition isotopique de l'uranium naturel :

	Isotopes	Pourcentage de la masse d'uranium naturel
Uranium naturel	Uranium 238	99,270
	Uranium 235	0,718
	Uranium 234	0,0056

(Selon l'usage, « un curie d'uranium naturel » correspond à $3,7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde de ^{238}U , plus $3,7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde de ^{235}U , plus $1,7 \cdot 10^9$ désintégrations par seconde de ^{234}U .)

Les travaux de Turner (8, 9)

Un travail qui reste toujours d'actualité a été fait au Royaume-Uni par Turner il y a une quinzaine d'années. Ce travail, fondé sur des recherches et des enquêtes épidémiologiques très sérieuses menées en Grande-Bretagne sur les eaux potables distribuées à la population, montre que l'absorption quotidienne moyenne du radium 226 à partir de l'eau potable est plus de 30 fois plus importante dans les Cornouailles que dans le Pays de Galles. Or aucune augmentation du taux normal de mortalité par cancer ou leucémie ne peut être mise en évidence dans la région des Cornouailles où, bien au contraire, le taux standard de mortalité pour ces deux affections est même nettement inférieur au taux national.

Par contre, bien que les Comtés du Pays de Galles choisis comme témoins soient alimentés en eau potable comportant une radioactivité naturelle exceptionnellement faible, il y est constaté, depuis de

nombreuses années, un dépassement très important du taux standard de mortalité, notamment par cancers, atteignant 38 p. cent. Les eaux correspondantes proviennent généralement de drainages en surface, comportent un pH bas à l'origine, et sont très faiblement minéralisées (moins de 50 ppm de matières minérales dissoutes), alors que les eaux des Cornouailles (région dans laquelle le taux de mortalité est remarquablement bas bien qu'elles soient beaucoup plus radioactives) comportent plus de 200 ppm de matières minérales dissoutes.

Turner conclut en recommandant de porter attention, plus qu'à la radioactivité des eaux potables, à leur *composition exacte en oligo-éléments minéraux*, présents à l'état de traces dans les eaux dites douces (soft water), sur lesquelles le manque de connaissances reste total, même encore à l'heure

actuelle, au point de vue épidémiologique. Des enquêtes du même type ont, depuis, donné des résultats comparables notamment en Suède, au Canada, et aux Etats-Unis, mais on n'a pas encore réussi à expliquer pourquoi les eaux « légères » sont ainsi plus dangereuses que les eaux très minéralisées. Ce qui est en tout cas certain, c'est que la radioactivité n'y est pour rien.

Entre-temps une remarquable confrontation expérimentale a montré la justesse de l'interprétation de Turner : plusieurs Comtés du Pays de Galles (où la radioactivité était la plus faible avec un taux de mortalité plus élevé) ont été alimentés avec de l'eau amenée par aqueducs depuis les Cornouailles : au bout de cinq ans, le taux standard de mortalité s'y est abaissé progressivement jusqu'à celui, nettement plus faible, des Cornouailles.

REFERENCES

1. Lepape A. — Les données numériques actuelles sur la radioactivité des sources thermales françaises. *Ann. Inst. Hydrol. Climatol.*, 1924, 2, 44-60.
2. Rapports mensuels, trimestriels et annuels du SCPRI depuis 1960.
3. Remy M.L., Pellerin P. — Radioactivité naturelle de 250 sources hydrominérales françaises. *Bulletin INSERM*, 1968, 23, 23-62.
4. Remy M.L., Gahinet M.E., Moroni J.P., Pellerin P. — *Quelques observations à propos de la radioactivité naturelle de l'alimentation en France. Séminaire sur la charge radiologique de l'homme liée à la radioactivité naturelle dans les pays de la Communauté Européenne*. CCE Le Vésinet, 4-6 décembre 1979.
5. Kuznetsov V.I., Akimova T.C. — Méthode améliorée de coprécipitation de l'uranium dans les eaux naturelles. *Radiokhimiya (URSS)*, 1960, 2, 426-430.
6. Grandpierre R., Pellerin P., Arnaud Y., Blanquet P., Moroni J.P. — La radioactivité des eaux et des gaz de Bagnères-de-Luchon. *Ann. Inst. d'Hydrol.*, 1962, 23, 1-18.
7. Caujole F., Auvergnat R., Oustrin J. — Régime radioactif de l'aire d'émergence luchonnaise. *Presse therm. clim.*, 1961, 98, 95.
8. Turner R.C., Radley J.M., Mayneord W.W. — Naturally occurring alpha-activity of drinking waters. *Nature*, 1961, 189, 348-352.
9. Turner R.C. — Radioactivity and hardness of drinking water in relation to cancer mortality rates. *Brit. Water Works Assoc. J.*, 1962, 44, 613-629.
10. Durum W.H. — Proceedings of conference on Physiological Aspects of Water Quality. *Washington D.C.*, 1960, 51.

Informations

4^{es} JOURNEES ALPINES DE L'ASTHME ET DE CLIMATOTHERAPIE D'ALTITUDE

Briançon, 21-23 janvier 1983

Avant-programme

Les 4^{es} Journées Alpines de l'Asthme et de Climatotherapie d'Altitude se tiendront en janvier 1983 sous la présidence du Professeur Jacques Charpin selon le programme suivant :

Vendredi 21 janvier

- 9 h 30 : Séance inaugurale,
 10 h à 12 h : Météorologie et climatologie médicale,
 16 h 30 à 19 h 30 : Asthme et climatotherapie d'altitude

Samedi 22 janvier

- 9 h à 11 h 30 : Conférences d'actualité en pneumologie,
 : Communications scientifiques sur l'asthme,
 16 h 30 à 19 h 30 : Réunion commune avec la Société de Pneumophtisiologie du Sud-Est et du Littoral Méditerranéen.

Dimanche 23 janvier

Coupe de ski des pneumologues et des allergologues.

Renseignements :

Union Briançonnaise de Recherches et d'Action Climatiques (UBRAC), 35, route de Grenoble, 05100 BRIANÇON.
 Tél. : (92) 21.18.17.

oligosols®

- | | | |
|---|---|--|
| <p> Aluminium Oligosol
4 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● atonie <p>AMM 307511.6</p> | <p> Lithium Oligosol
8,14 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● troubles du psychisme <p>AMM 307515.1</p> | <p> Phosphore Oligosol
0,14 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements parathyroïdiens ■ contre-indication : tuberculose aiguë <p>AMM 307520.5</p> |
| <p> Bismuth Oligosol
0,07 mg/1 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● amygdalites, laryngites (ne pas utiliser plus de trois jours sans avis médical) <p>Visa NL 1806</p> | <p> Magnésium Oligosol
1,78 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● états intestinaux <p>AMM 307516.8</p> | <p> Potassium Oligosol
0,24 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● troubles du métabolisme de l'eau <p>Visa 19.558 b - 20.975 - Tableau C</p> |
| <p> Cobalt Oligosol
0,45 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● régulation du système sympathique <p>AMM 307513.9</p> | <p> Manganèse Oligosol
0,59 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● états arthritiques ■ contre-indications : tuberculose et affections pulmonaires <p>AMM 307517.4</p> | <p> Soufre Oligosol
0,30 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements hépato-biliaires <p>Visa 19.558 b - 20.980</p> |
| <p> Cuivre Oligosol
5,18 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● états infectieux <p>Visa 19.558 b - 20.978</p> | <p> Manganèse-Cobalt Oligosol
0,59 mg-0,554 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dystonies neuro-végétatives ■ contre-indications : tuberculose et affections pulmonaires <p>AMM 307508.5</p> | <p> Zinc Oligosol
0,47 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements hypophysaires ■ contre-indications : tuberculose évolutive et cancer déclaré <p>AMM 307524.0</p> |
| <p> Cuivre-Or-Argent Oligosol
0,45 mg-0,0014 mg-0,06 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● états anergiques <p>Visa NL 2145</p> | <p> Manganèse-Cuivre Oligosol
0,59 mg-0,518 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● états infectieux chroniques <p>AMM 307509.1</p> | <p> Zinc-Cuivre Oligosol
0,47 mg-0,518 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements hypophyso-gonadotropes ■ contre-indications : tuberculose évolutive et cancer déclaré <p>Visa 19.558 b - 20.981</p> |
| <p> Fluor Oligosol
0,442 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● atteintes osseuses <p>AMM 307514.5 - Tableau C</p> | <p> Manganèse-Cuivre-Cobalt Oligosol
0,59 mg-0,518 mg-0,554 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● anémies <p>Visa 19.558 b - 20.976</p> | <p> Zinc-Nickel-Cobalt Oligosol
0,47 mg-0,556 mg-0,554 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements hypophyso-pancréatiques <p>AMM 307526.3</p> |
| <p> Iode Oligosol
0,024 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements thyroïdiens <p>AMM 307528.6 - Tableau C</p> | <p> Nickel-Cobalt Oligosol
0,556 mg-0,554 mg/2 ml</p> <ul style="list-style-type: none"> ● dysfonctionnements pancréatiques <p>AMM 307526.3</p> | |

Posologie et voie d'administration

1 à 2 prises par jour ou plus en fonction de l'état. Voie perlinguale de préférence le matin à jeun ou loin des repas.

Formes et présentations - Prix publics - Coûts de traitement journalier

Remboursement Sécurité Sociale à 70%

 Flacon multidose pour la voie perlinguale (60 ml)
1 cuillère doseuse = 2 ml - Prix public : 13,60 F
Coût de traitement journalier : 0,45 F à 0,90 F

 Ampoules injectables (I.M.) et pour la voie perlinguale
(14 amp. x 2 ml) - Prix public : 9,00 F
Coût de traitement journalier : 0,64 F à 1,28 F

 Flacons pressurisés doseurs pour la voie perlinguale (60 ml)
1 distribution = 2 ml - Prix public : 14,00 F
Coût de traitement journalier : 0,46 F à 0,92 F

LABCATAL - thérapeutique fonctionnelle - 7 rue roger salengro, 92120 montrouge - tél. 654.27.92

Observations géothermiques à l'aide des paramètres géochimiques des eaux carbogazeuses de la partie orientale de l'Eifel dans le Massif schisteux Rhénan

R. LANGGUTH, H. PLUM *
(Aix-la-Chapelle)

Dans le cadre d'un projet de recherche dans le Massif Rhénan, en particulier dans la montagne de l'Eifel, 146 points d'eaux minérales (sources naturelles, sources captées, forages) ont pu être échantillonnés presque simultanément (dosages systématiques chimiques, qualités physico-chimiques, composition isotopique, teneur en gaz dissous). Il s'agit d'une étude hydrogéologique à but géothermique dans une région pauvre en indices proprement géothermiques à la surface [3].

La région étudiée peut être circonscrite par un polygone formé par la situation géographique des villes de Liège, Maestricht, Aix-la-Chapelle, Cologne, Bonn, Coblenze, Trèves et Malmédy (fig. 1). Elle comprend ainsi la partie de la rive gauche du Rhin dans le Massif schisteux Rhénan au nord de la Moselle avec les Hautes Fagnes dans les Ardennes.

Dans cette région on peut (voir fig. 1) observer trois zones avec une haute densité en points d'émergences des eaux minérales :

- zone 1 : Hautes Fagnes - Ardennes - Aix-la-Chapelle ;
- zone 2 : Eifel Occidental - vallée de la Moselle ;
- zone 3 : Eifel Oriental - vallée du Rhin.

Le Massif schisteux Rhénan [4] est formé par des couches plissées du Cambrien jusqu'au Dévonien moyen. Il s'agit des roches psammitiques et gréseuses en général. Dans le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur on note la présence des

calcaires à la bordure Nord des Hautes Fagnes et dans la zone de dépression N-S eifélienne. La zone 3 qui seule fait l'objet de cette étude est presque entièrement située dans les schistes et grès du Dévonien inférieur. Mais elle est aussi caractérisée par un jeune volcanisme pendant le Tertiaire et le Quaternaire [1], appartenant à la province volcanique dite « péri-alpine » au sens de la géologie régionale.

La caractérisation des eaux minérales de la zone Eifel Oriental - vallée du Rhin

L'interprétation se base sur 68 sources minérales et thermales et de deux acratopèges (situation : voir par exemple fig. 6 et fig. 7) se concentrant dans les vallées du Rhin moyen au sens géographique, dans la vallée de l'Ahr et autour du Lac de Laach.

La composition chimique est représentée sur les diagrammes triangulaires des figures 2 (anions) et 3 (cations). Le type « Saeuerling » (eau carbogazeuse) coïncide avec la dominance en HCO_3^- , mais on remarque en même temps un enrichissement en chlorures, surtout dans l'axe de la vallée du Rhin. Mais d'une manière générale les points sur la figure 2 se concentrent bien.

Par rapport aux anions, les cations (fig. 3) montrent une plus grande dispersion. Ici il faut tenir compte des échanges des bases. Des sous-régions peuvent être distinguées, caractérisées par les teneurs $\text{Na} + \text{K} < 50$ p. cent en milliéquivalents (zone du Lac de Laach), ou $\text{Na} + \text{K} \gg 50$ p. cent en milliéquivalents (axe de la vallée du Rhin). La concentration totale (somme des ions dissous) des eaux se range entre 500 mg/litre et 13 000 mg/litre.

* Lehrstuhl für Hydrogeologie, RWTH Aachen, Templergraben 55, D - 51 - Aix-la-Chapelle (Allemagne Fédérale).

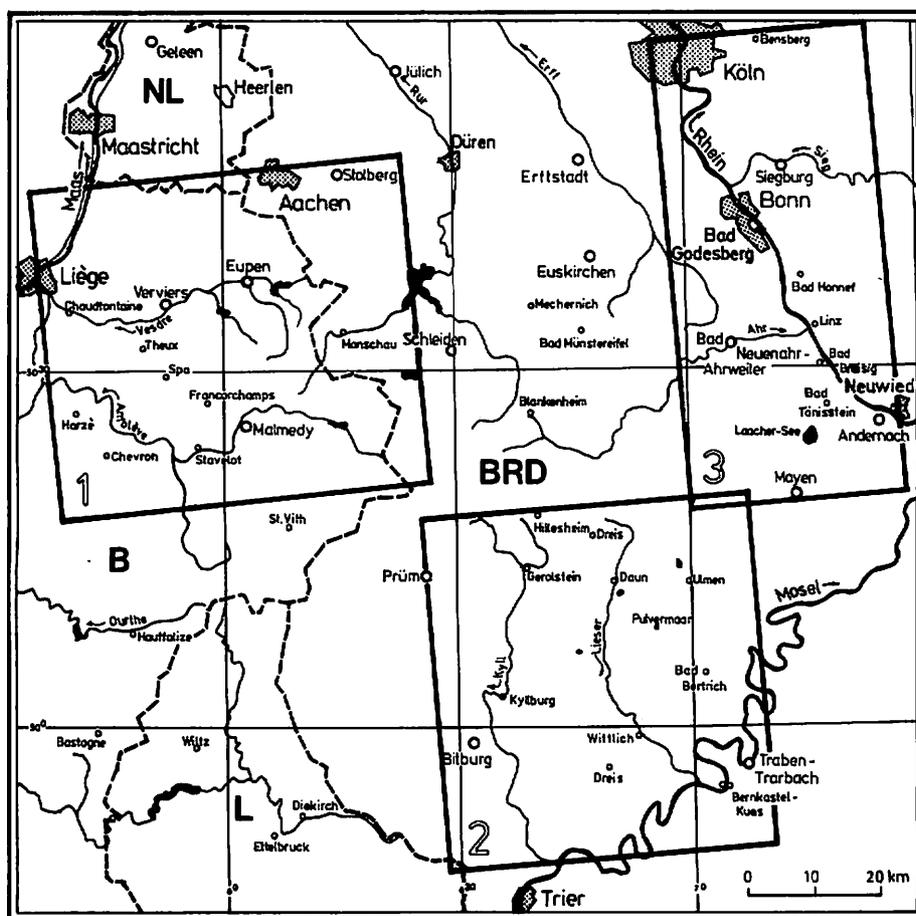


Fig. 1. — Situation géographique de la région étudiée.

La figure 4 contient l'étude statistique de la température des eaux à l'émergence. Il s'agit donc d'eaux plutôt hypothermales. Les eaux les plus chaudes se trouvent dans la vallée du Rhin et celle de l'Ahr. Mais dans la région du Lac de Laach les eaux sont froides.

La figure 5 enfin donne la répartition statistique de la teneur en gaz CO_2 dissous. Les eaux de la zone étudiée se rangent dans un intervalle de 500 à plus de 4 000 mg/litre CO_2 passant ainsi des eaux sous-saturées (ou diluées) à des eaux saturées et même sur-saturées aux conditions d'émergence.

Interprétation des données hydrogéochimiques en vue d'indices géothermiques

En surface, les paramètres suivants apparaissent en surface d'une manière cohérente et qualitative :

— *teneur en SiO_2* (fig. 6) : la masse des eaux n'a que des valeurs < 25 mg/litre. Autour du Lac de Laach on observe des valeurs jusqu'à 45 mg/

litre, mais ici dans des eaux froides. Les points forment ici une structure \pm circulaire. Par rapport à cela les eaux thermales de Bad Neuenahr et de Bad Breisig avec 35°C sont très pauvres en SiO_2 ;

— *rapport Na/K* : le rapport est, selon Fournier et Truesdell [2] fonction directe de la température du réservoir aquifère et des teneurs (élevées) en potassium. Aussi ici on observe autour du Lac de Laach une sorte d'auréole avec des valeurs $\lg \text{Na/K} < 1$, (fig. 7).

Des résultats analogues, mais d'une façon moins nette, fournissent les rapports Na/Li, F/Cl, Ca/Mg et Mg/ (K + Ca + Mg) ainsi que la teneur en F^- .

Une interprétation dans l'espace des teneurs en SiO_2 et du rapport Na/K aux environs du Lac de Laach se trouve sous forme de 2 coupes « hydrogéochimiques » sur la figure 8. Les teneurs en SiO_2 augmentent au fur et à mesure qu'on approche du Lac de tous les côtés, tandis que les rapports Na/K diminuent d'une façon exponentielle.

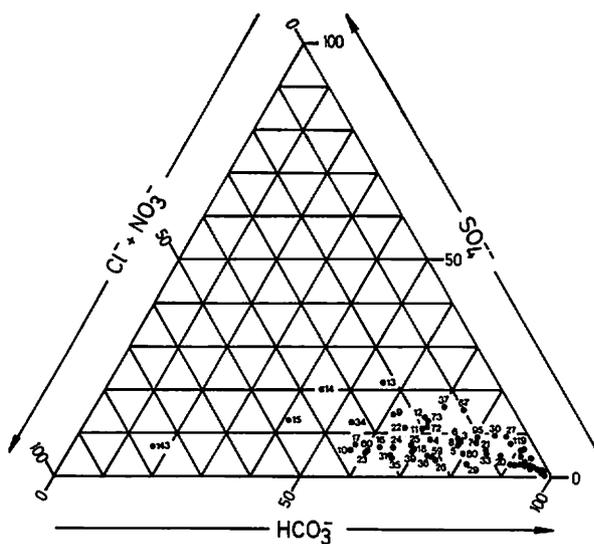


Fig. 2. — Représentation triangulaire des anions des eaux minérales de l'Eifel Oriental/vallée du Rhin en pourcentage de milli-équivalents. 34 = nombre de l'inventaire à Aix-la-Chapelle.

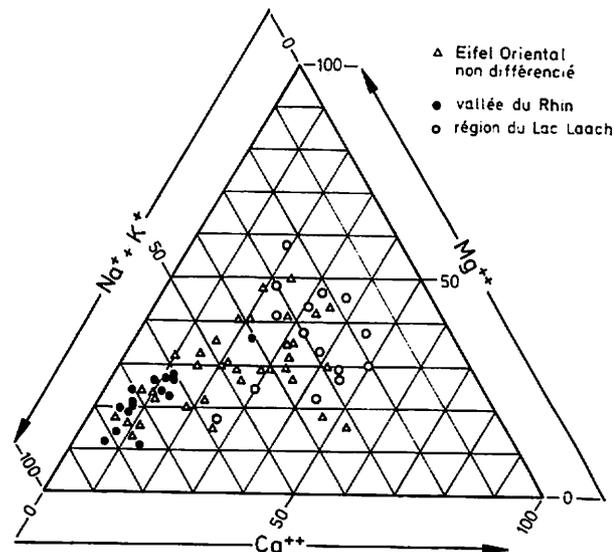


Fig. 3. — Représentation triangulaire des cations de l'Eifel Oriental/vallée du Rhin en pourcentage de milli-équivalents.

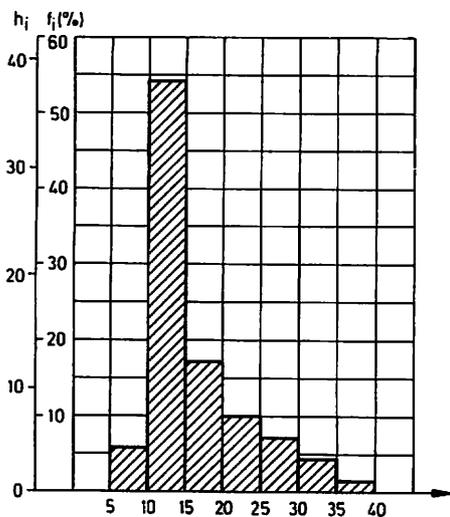


Fig. 4. — Distribution statistique des températures à l'émergence des eaux minérales de l'Eifel Oriental/vallée du Rhin. Classes en 5°C; n = 70.

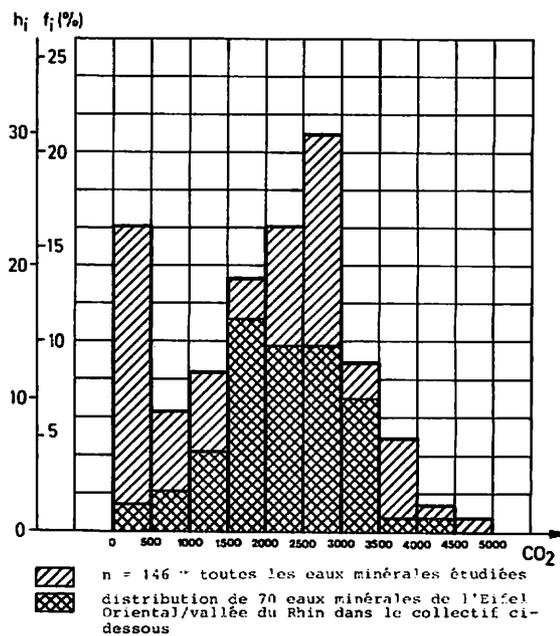


Fig. 5. — Distribution statistique des teneurs en CO₂ libre. Classes en 500 mg/l CO₂. Pour toute la région étudiée (n = 146) et pour l'Eifel Oriental/vallée du Rhin (n = 70).

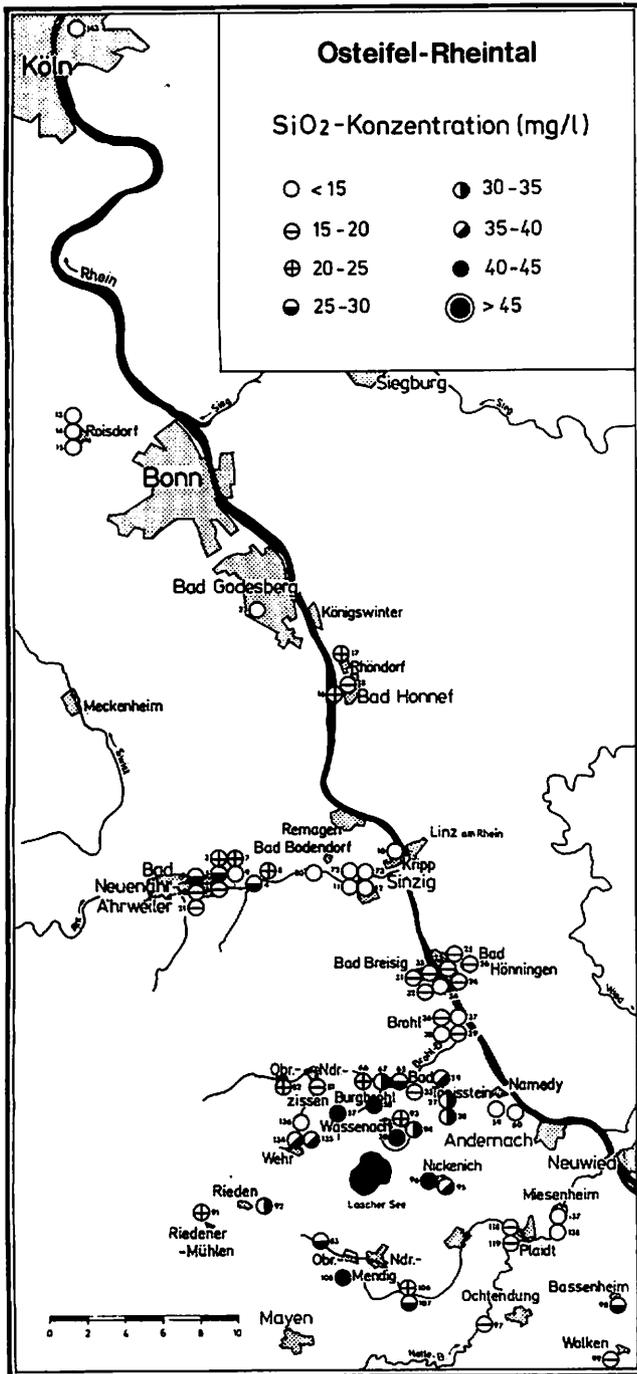


Fig. 6. — Concentrations en SiO₂ des eaux minérales de l'Eifel Oriental/vallée du Rhin.

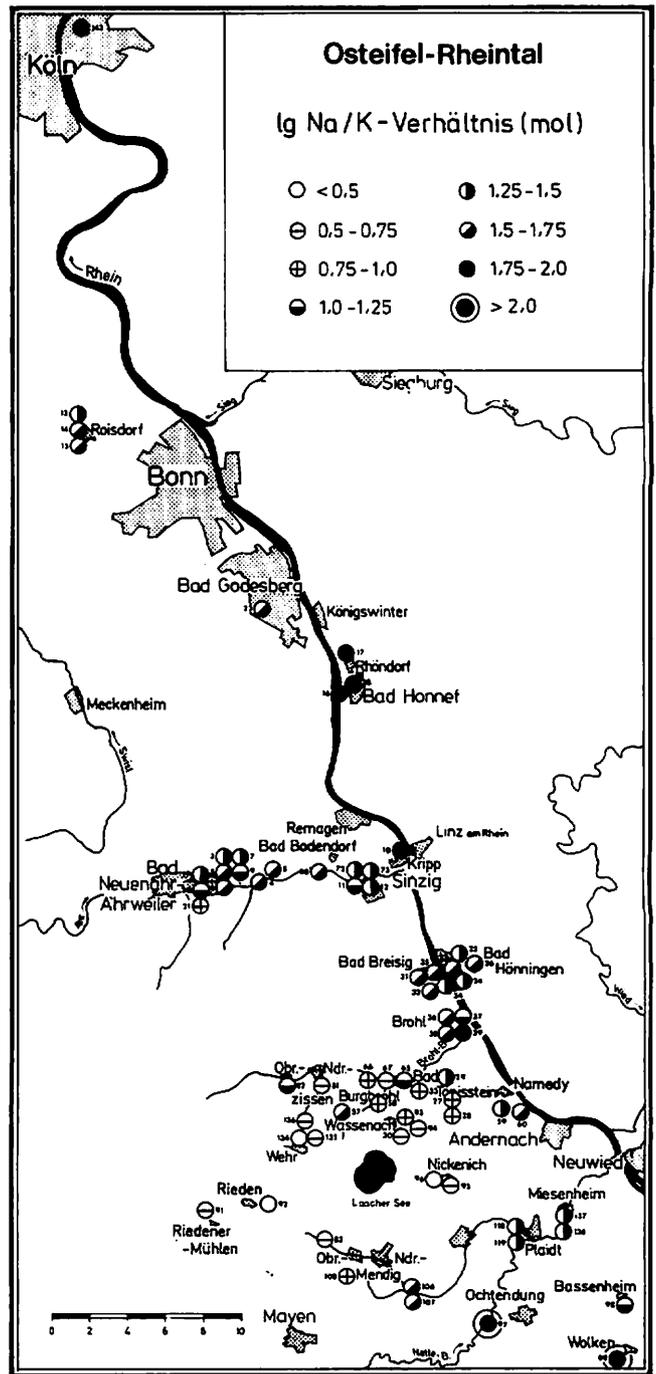


Fig. 7. — Le rapport lg Na/K (mol) des eaux minérales de l'Eifel Oriental/vallée du Rhin.

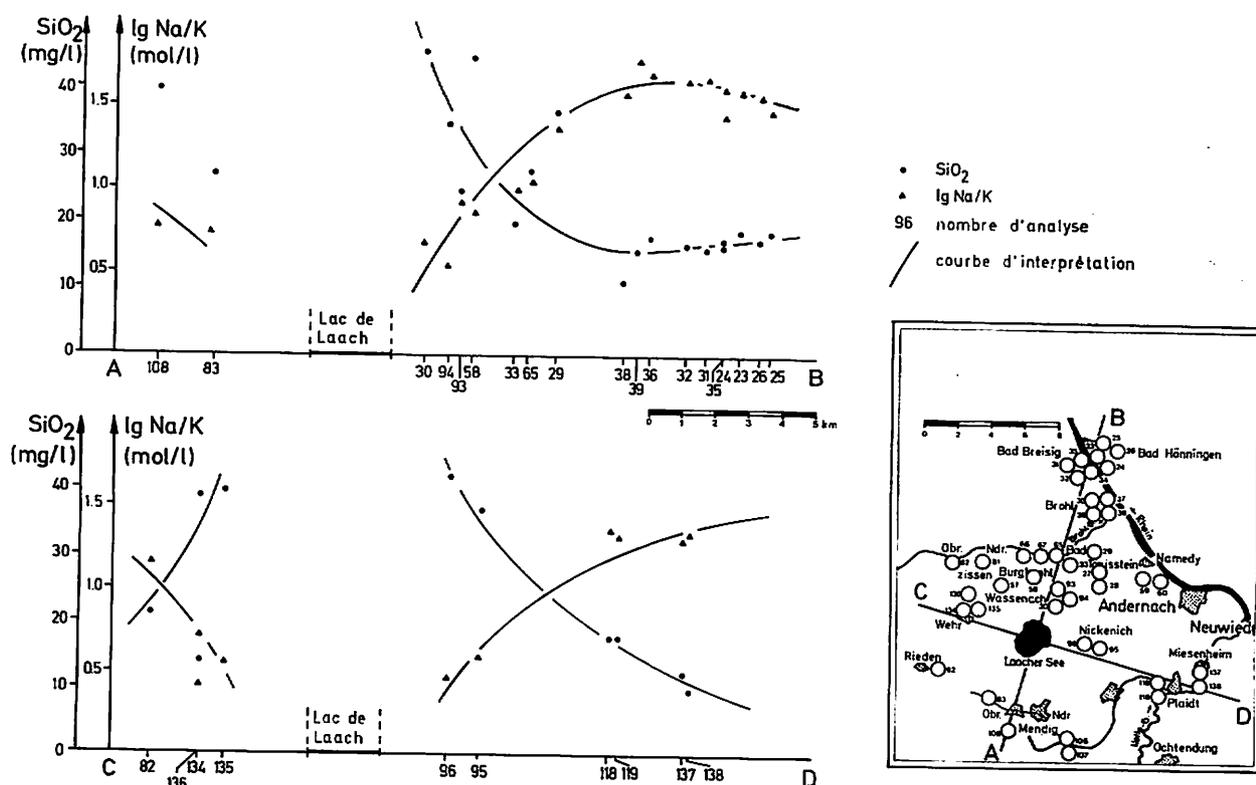


Fig. 8. — La variation de la concentration en SiO_2 et du rapport $\lg \text{Na/K}$ dans les eaux minérales autour du Lac de Laach le long de deux coupes « hydrogéochimiques ».

Le Lac de Laach a un diamètre de 2,2 km environ. Les coupes sur la figure 8 ont une longueur de 20 km environ. Dans toute la zone le sous-sol — voir ci-dessus — est constitué des roches dévonniennes. Seuls le volcanisme subrécent et la tectonique associée conviennent pour expliquer l'arrangement \pm concentrique des données de la fig. 8. La tectonique antérieure ne peut pas y servir.

C'est ainsi que nous avons toute raison d'expliquer l'anomalie « hydrogéochimique - hydrogéothermique » par une jeune chambre de magma en 5 à 8 km de profondeur environ qui était ailleurs déjà postulée par un raisonnement volcanique [5].

Une application de différents géothermomètres qui se prêtent dans une telle étude a eu lieu. Mais les résultats restent difficiles à interpréter et feront l'objet d'une étude ultérieure.

RESUME

Les données discutées permettent les conclusions suivantes :

— Dans l'Eifel Oriental les teneurs en SiO_2 et le rapport Na/K des eaux minérales et thermales montrent que dans le domaine du Lac de Laach une anomalie thermique pourrait exister dans le sous-sol ayant une forme \pm circulaire avec un diamètre de 5 à 6 km environ.

— Aussi les teneurs en F et les teneurs relatives en Mg ainsi que les rapports F/Cl , Ca/Mg et Na/Li indiquent — mais moins net — une augmentation de la température souterraine.

— L'origine de cette anomalie géothermique semble être une chambre de magma refroidissante dans plus de 5 km profondeur sous le lac de Laach, lui-même un cratère d'explosion phréatique très jeune. L'extension restreinte actuelle de l'anomalie y correspond bien. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux des recherches volcanologiques récentes [5].

RÉFÉRENCES

1. Carlé W. — *Die Mineral- und Thermalwaesser von Mitteleuropa. Geologie, Chemismus, Genese.* Stuttgart, Wiss. Verlagsgesellschaft, 1975.
2. Fournier R.O., Truesdell A.H. — An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, 37, 1255-1275.
3. Langguth H.R., Plum H. — Investigation of thermal and mineral springs in the Eifel. In: *Advances in European Geothermal*

- Research; Second Intern. Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research. Strasbourg (EC), 1980, 144-148.
4. Lotze F. — *Dorn-Lotze Geologie Mitteleuropas.* Stuttgart (Schweizerbart), 1971.
5. Schmincke H.U., Wörner G., Risse R., V.D. Bogaard P., Viereck L. — Laacher See Vulkan Magmakammer und « hot dry rock » Projekt Rieden (Osteifel). In: *Statusreport 1980 Geotechnik und Lagerstätten*, Jülich (Projektleitung Energieforschung KFA), 1980.

cauterets (65110) alt. 1000 m

**CURES THERMALES
TOUTE L'ANNEE**

**10 SOURCES THERMALES
SULFUREES SODIQUES ET**

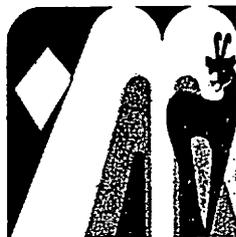
7 ETABLISSEMENTS DE SOINS

- MALADIES DE LA GORGE ET DE LA VOIX,
- AFFECTIONS NASO-SINUSIENNES
ET BRONCHIQUES,
- AFFECTIONS TUBO-AURICULAIRES,
- RHUMATOLOGIE.

EQUIPEMENT THERAPEUTIQUE MODELE :

Douches pharyngiennes, insufflations tubaires, humages, aérosols, méthode de Proëtz, douches nasales et rétro nasales, rééducation respiratoire et cures déclives.

Renseignements : CLIMAT DE MONTAGNE au cœur du
(62) 92.50.27 PARC NATIONAL DES PYRENEES
92.51.60



capvern (65130) alt. 480 m

les bains

2 mai - 15 octobre

**2 sources sulfatées calciques
magnésiennes, radioactives**

- AFFECTIONS URINAIRES ET RENALES.
- AFFECTIONS HEPATO-BILIAIRES.
- MALADIES DE LA NUTRITION.
- SEQUELLES DES AFFECTIONS TROPICALES.

Bains thermo-gazeux et carbo-gazeux, massages sous l'eau

Climat de moyenne altitude, à la fois tonique et sédatif

Renseignements : 16-62 39.00.02 Société thermale
16-62 39.00.46 Syndicat d'Initiative

monographies d'urologie

publiées par A. STEG
et L. BOCCON-GIBOD

2

La prostate

sous la direction de
L. Boccon-Gibod et A. Steg

★

Il y a quinze ans, la question « quoi de neuf en pathologie prostatique » ne suscitait chez un maître de l'urologie qu'un laconique « rien ». Par cette réponse ne serait plus possible aujourd'hui. C'est la raison d'être de cette seconde livraison des monographies d'urologie.

★

Un ouvrage 17,5×22,5
200 pages, 58 figures

Prix en nos magasins : 110 F
franco domicile : 119 F

★

Rappel :

Monographies d'Urologie n° 1 :
« Tumeurs du rein »

En vente chez votre libraire spécialisé habituel
ou à l'Expansion Scientifique Française
15, rue Saint-Benoît, 75278 Paris Cedex 06

L'hydrothermalisme de la basse-vallée de l'Adour et le gisement de Dax

P. POUCHAN, A. CAZAL *

(Bordeaux)

Examinant successivement l'origine de l'eau, les aquifères, l'alimentation des nappes profondes, la stimulation de la production et l'amélioration des captages, l'auteur montre l'intérêt de l'hypothèse qui envisage l'existence de deux réservoirs dolomitiques. Cette théorie permet d'expliquer les différences de composition chimique, de température et d'insister sur la prudence avec laquelle doit être envisagée tout développement de la production.

Quelques données assez récentes semblent de nature à pouvoir apporter aujourd'hui des précisions intéressantes concernant le gisement hydrothermal de Dax.

L'ORIGINE DE L'EAU

Le critère de température a depuis longtemps conduit les auteurs qui se sont penchés sur ce problème à envisager une origine profonde, d'au moins 1 700 m à 1 800 m, par le biais d'un gradient géothermique moyen de l'ordre de 3 °C par 100 m de profondeur.

Ainsi s'expliquent les températures de l'ordre de 61 °C relevées aux griffons les plus chauds.

Ces estimations concernant le gradient géothermique se trouvent bien confirmées par les récentes données sur la géothermie en Aquitaine, publiées tout récemment.

LES AQUIFÈRES

L'étroite relation entre l'eau thermale et la roche dolomitique est un fait d'observation ancienne. On

a pu maintes fois vérifier les propriétés réservoir de la dolomie subaffleurant le long de la rive gauche de l'Adour à Dax. La dolomie possède une porosité double : de matrice à pores très fins et de chenaux de dimension décimétrique à métrique largement développés.

On est aujourd'hui à peu près certain qu'un vaste panneau de réservoir dolomitique profond a été soulevé et redressé au cours de l'édification de la structure diapirique de Dax. Le fait le plus étonnant, mais bien réel, est son enracinement, ou en d'autres termes, la continuité hydraulique maintenue sur près de 2 000 m de profondeur, qui permet la remontée rapide de l'eau souterraine.

L'âge de la dolomie est, par contre aujourd'hui, plus controversé, et nous ne sommes pas loin de penser qu'il existe, en fait, deux horizons dolomitiques d'âge différents, ayant des propriétés réservoir assez semblables, mais correspondant à des aquifères de profondeurs variables.

Le premier aquifère serait celui du paléocène, voire du Danien. Il lui correspondrait, à l'affleurement dacquois, une dolomie rose. Il véhiculerait une eau « tiède » de l'ordre de 40° à 45°, selon les lieux (trou des pauvres, écaillés de subsurface vers l'est de la structure).

Le deuxième aquifère serait celui du Cénomani. Il lui correspondrait une dolomie blanche. Il véhiculerait une eau « chaude » d'origine plus profonde et correspondant à des températures supérieures à 60 °C.

La complexité de l'architecture a créé des zones où les deux systèmes se chevauchent et où on observe des températures dites intermédiaires qui correspondent bien à l'interconnexion des réseaux poreux dans les zones proches de la surface.

* Institut de Géodynamique, Université de Bordeaux III.

QUELQUES DONNÉES RÉCENTES

Elles viennent d'être apportées par le forage géothermique de Saubagnacq, qui a traversé les horizons fissurés de la dolomie cénomaniennne, dans le synclinal vers 2 300 m de profondeur.

Les différents tests et essais effectués sur ce puits ont bien montré l'interconnexion des différents aquifères hydrothermaux. En effet, les captages, non seulement de Dax, mais aussi de St-Paul et Saubuse sont influencés. L'eau révèle une composition chimique tout à fait semblable.

Le fait le plus surprenant est la température de 56 °C mesurée en fond de trou à 2 300 m de profondeur. Nous avons tenté d'expliquer cette anomalie en réalisant un modèle de simulation. Les résultats montrent que les fortes températures, de l'ordre de 64 °C relevées aux exutoires dacquois, ne peuvent pas être expliquées sans faire intervenir un apport supplémentaire de chaleur le long de la branche ascendante de la dolomie.

Une hypothèse convenable, exprimée par le modèle, consisterait à admettre qu'un aquifère plus profond, viendrait se pincer contre le dôme salifère et apporter un flux de chaleur supplémentaire, probablement par conduction.

L'ALIMENTATION DES NAPPES PROFONDES

Ainsi que l'ont déjà fait remarquer quelques auteurs, l'émergence de l'eau implique l'évacuation locale d'un flux de chaleur non négligeable qui nécessite le développement souterrain d'une large surface de chauffe, c'est-à-dire d'un aquifère d'extension.

Si l'on jette un coup d'œil sur les dimensions et les conditions d'alimentation ou d'exutoire des aquifères crétacés de l'Aquitaine méridionale, on est rapidement conduit à envisager que les nappes du Crétacé sont probablement « envahies » par des eaux en provenance des aquifères supérieurs, probablement du tertiaire.

Les nappes crétacées se fermant vers l'ouest par compacité, il faut admettre que les émergences de la vallée de l'Adour sont les exutoires naturels de ces nappes. Il n'y a probablement pas d'exutoire profond sous l'océan.

STIMULATION DE LA PRODUCTION ET AMÉLIORATION DES CAPTAGES

Les griffons naturels de la fontaine chaude entraînent le quasi-affleurement de la dolomie à ce point. La pression des eaux chaudes profondes était, à l'origine supérieure à la pression des eaux froides de la nappe phréatique, et les alluvions perméables étaient « envahies » par l'eau thermale tout autour de la source de la Nèhe.

Cette relation avec les eaux phréatiques est bien marquée par les oscillations des niveaux piézométriques liées à la contrepression des eaux de surface soumises à la variation climatique.

La stimulation de la production par forage a un aspect positif. Elle a conduit à réaliser des captages propres et bien isolés des nappes de surface.

Toutefois, la multiplication des captages et leur exploitation inconsidérée peut avoir des effets pernicieux. Le pompage conduit en effet à une chute de pression de l'ensemble du gisement, de sorte que la pression d'eau froide peut devenir supérieure à celle de l'eau chaude. Dès lors, il y a transfert des eaux froides vers le gisement et, de ce fait, pollution de ce dernier, principalement dans les zones de contact (Fontaine chaude).

CONCLUSION

Les connaissances acquises ces dernières années, complètes, plus qu'elles ne changent, les conclusions des auteurs antérieurs. Les faits les plus intéressants sont les suivants :

— Il semble que l'ascension des eaux chaudes s'effectue principalement à partir du synclinal de Saubagnacq, situé à l'ouest de la structure.

— L'hypothèse des deux réservoirs dolomitiques est fructueuse car elle permettra sans doute d'expliquer des compositions chimiques des eaux différentes et des températures variables. Les proportions de « mélange » pourront être calculées et les propriétés respectives des deux types d'eau devraient être étudiées médicalement.

— Le développement de la production hydrothermale ne devra être entreprise qu'avec prudence, si l'on mesure les risques de tous ordres qui menacent les émergences naturelles de l'ensemble de la vallée de l'Adour. L'avenir conduira, sans doute, à la notion de gestion globale de la ressource hydrothermale.

REPERTOIRE DES ANNONCEURS

Cauterets/Capvern - Cures thermales, p. 162.

E.S.F. - « La Prostate », p. 162.

Labcatal - Oligosols, p. 156.

Maison du Thermalisme/Chaîne thermale du soleil, 2^e couverture.
Semaine des Hôpitaux, p. 120.

La Presse Thermale et Climatique

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

Ancienne GAZETTE DES EAUX

Fondateur : Victor GARDETTE †

COMITE DE PATRONAGE

Professeur ARNOUX. — Professeur F. BESANÇON. — G. BONNET. — Doyen G. CABANEL. — Professeur CORNET. — Professeur Agrégé V. COTLENKO. — Professeur Agrégé C. DELBOY. — Professeur Y. DENARD. — Professeur P. DESGREZ. — Professeur J.-J. DUBARRY. — Professeur M. FONTAN. — Professeur GONIN. — Professeur GRANDPIERRE, Directeur du Centre d'Enseignement et de Recherches de Médecine aéronautique de Paris. — GRISOLET, Ingénieur en chef de la Météorologie, Chef du Service d'Etudes Climatiques de la Ville de Paris. — Professeur JUSTIN-BESANÇON, Membre de l'Académie de Médecine. — Professeur Cl. LAROCHE. — Professeur J. LOUVEL. — P. MOLINÉRY. — J. PASSA. — R. SOYER, Assistant au Muséum National d'Histoire naturelle. — P.M. de TRAVERSE, Chef de Laboratoire, Hôpital Broussais.

COMITE DE REDACTION

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

Rédacteur en chef : J. FRANÇON, Secrétaire de Rédaction : R. JEAN.

Biologie : P. NEPVEUX. — Veines : J. FOLLEREAU, R. CAPODURO, M^{me} C. LARY-JULLIEN. — Cœur : C. AMBROSI, J. BERTHIER, A. PITON. — Dermatologie : P. BAILLET, P. HARDY. — Hépatologie et Gastroentérologie : H. DANY, M^{me} GIRAU'T, J. de la TOUR. — Gynécologie : Y. CANEL. — Neuro-psychiatrie : J.-C. DUBOIS, H. FOUNAU, L. VIDART. — Pathologie ostéo-articulaire : F. FORESTIER, J. FRANÇON, A. LARY, R. LOUIS. — Pédiatrie : J. CHAREIRE, R. JEAN. — Néphrologie et Urologie : J. COTTET, J. FOGLIERINI, J. THOMAS. — Voies respiratoires : A. DEBIDOUR, R. FLURIN, J. MAUGEIS de BOURGUESDON. — Etudes hydrologiques et thermales : B. NINARD.

COMITE MEDICAL DES STATIONS THERMALES

M^{me} DELABROISE, G. EBRARD, G. GODLEWSKI, J. LACARIN.

Les opinions exprimées dans les articles ou reproduites dans les analyses n'engagent que les auteurs.

Éditeur : **EXPANSION SCIENTIFIQUE FRANÇAISE**

15, rue Saint-Benoît - 75278 PARIS CEDEX 06

Tél. (1) 548.42.60 - C.C.P. 370-70 Paris

TARIFS DE L'ABONNEMENT

4 numéros par an

FRANCE : 125 F — ETRANGER : 150 F

Prix du numéro : 45 F



La Presse Thermale et Climatique

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

SOMMAIRE

LES EAUX THERMOMINÉRALES

Association des Géologues du Sud-Ouest

Bagnères-de-Luchon, 15 et 16 octobre 1981

Les indications médicales des stations thermales françaises, par Y. Denard	117
Les circulations hydrothermales : thermalité et effet de gas-lift, par J. Maisonneuve	121
Quelques problèmes spécifiques à la recherche et au captage des eaux minérales, par M. Bourgeois	132
Les gaz associés aux eaux thermominérales, par F. Mercier-Batard et J.-J. Risler	139
Quelques données récentes sur la radioactivité naturelle des sources hydrominérales françaises, par M.-L. Rémy et P. Pellerin	150
Observations géothermiques à l'aide de paramètres géochimiques des eaux carbogazeuses de la partie orientale de l'Eifel dans le Massif schisteux Rhénan, par R. Langguth et H. Plum ..	157
L'hydrothermalisme de la basse-vallée de l'Adour et le gisement de Dax, par P. Pouchan et A. Cazal	163
—————	
Informations	155