AUVERGNE SCIENCES

BULLETIN DE L'ADASTA

Juin 98 N° 42

Les sources intermittentes

Les glacières naturelles

L'eau minérale naturelle de Volvic

Les oligo-éléments

ASSOCIATION POUR LE
DEVELOPPEMENT DE L'
ANIMATION
SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE EN
AUVERGNE

SOMMAIRE

N° 42

Editorial p.2

Le Dossier
Les sources intermittentes p.3

Le Dossier
Les glacières naturelles p. 11

Le Dossier
Volvic, des pierres, des volcans et des sources p.13

Le Dossier
Eléments traces et eau minérale, Oligo-éléments et Thermalisme p.17

Informations diverses
Douze expositions itinérantes p. 25

PERMANENCES
Tous les jours ouvrables
de 9 h à 12 h
et le mercredi de 14 h à 17 h.

AUVERGNE- SCIENCES

Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de Publication
Suzanne GELY
Rédaction : Jocelyne ALLEE
N° ISNN 1166-5904

Photo de couverture :
La Source de La Gargouillère en éruption.
(Photo J.P. Couturié)
Dépôt légal JUIN 1998
•Imprimerie Pougheon • Clermont-Ferrand •

EDITORIAL

L'ADASTA continue sa route grâce à tous les bénévoles qui se dévouent pour le secrétariat et la poursuite des différentes activités de notre association. Voici un nouveau numéro de notre Revue. Il est consacré à l'eau, précieuse ressource naturelle, indispensable à la survie de l'Humanité. L'Auvergne est particulièrement riche, non seulement en stations thermales bienfaisantes, mais aussi en sources d'eau naturelles apportant chaque jour à notre organisme certains oligo-éléments nécessaires à la santé.

Notre dévouée rédactrice, Jocelyne Allée, qui dirige la Revue, a écrit pour vous un article de synthèse sur les célèbres sources de Volvic. Nos amis Roland Jouanisson et Jean-Pierre Couturié contribuent aussi à vous faire connaître les particularités régionales. Il faut remercier vivement le Professeur Denise Pépin qui a su intéresser la Société des Eaux de Volvic à notre action de vulgarisation et obtenir une importante contribution financière permettant la publication de ce numéro célébrant une des plus grandes richesses de l'Auvergne.

La Présidente
Suzanne GELY

Ce numéro a été réalisé avec l'aide de la Société des Eaux de Volvic...

... Merci à nos partenaires

Adhésions et Abonnements

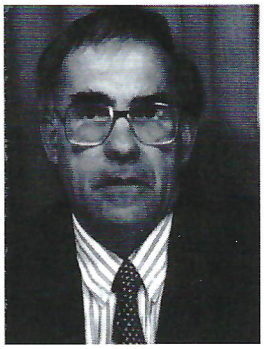
Adhésions à titre individuel _____ 150 F
Adhésions à titre collectif _____ 500 F
Membre bienfaiteur _____ 1 000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites...)
Adresser le courrier à **ADASTA, 19 rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**
Tél. 04 73 92 12 24 - 04 73 92 11 04

L'eau et le gaz carbonique :

les sources minérales intermittentes et les geysers

Jean-Pierre Couturié



Maître de conférences en géologie à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, spécialité pétrologie des granites, hydrogéologie, minéralogie et métallogénie.

Les sources intermittentes font partie de ces phénomènes naturels qui ont de tout temps frappé les esprits. Elles se caractérisent par une activité périodique, plus ou moins régulière, mais indépendante de la pluviosité. Les sources qui tarissent simplement en période de sécheresse ne méritent pas ce qualificatif.

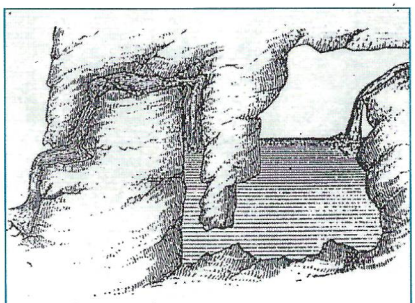


Fig. 1 : Source intermittente à siphon.

Parmi les véritables sources intermittentes, certaines ont un fonctionnement qui s'apparente à celui des chasses d'eau automatiques. Leur mécanisme (fig.1) correspond à la vidange, par un siphon à gros débit qui s'amorce spontanément en fin de remplissage, d'un réservoir alimenté de façon continue. La résurgence intermittente de Fontestorbes (Ariège) parait fonctionner sur ce principe, avec toutefois une "plomberie" naturelle de forme beaucoup plus irrégulière que celle des installations humaines.

Les sources minérales régionales, origine du CO_2

Nous nous intéresserons plus particulièrement ici à certaines sources minérales carbogazeuses, thermales ou non, qui émettent à intervalles plus ou moins réguliers, des jets d'eau et de gaz carbonique émulsionnés. Leur fonctionnement, ainsi que nous le verrons, est assez comparable à celui des geysers classiques à eau bouillante, aussi peut-on parler dans ce cas de geysers carbogazeux. Il en existe plusieurs exemples dans la région qui sont des cas particuliers parmi les nombreuses sources minérales.

L'Auvergne est en effet une région particulièrement riche en sources minérales carbogazeuses: plus de cinq cents y ont été dénombrées par Lecoq en 1865. Elle possède aussi de nombreux volcans éteints, certains depuis peu. Ces deux particularités de l'Auvergne, sans qu'il y ait de relations de cause à effet entre l'une et l'autre, sont dues à sa structure profonde, mise en évidence par les méthodes sismiques.

A l'époque oligocène (environ -35 millions d'années), au moment de la formation des Alpes, la lithosphère (croûte et partie supérieure du manteau) a subi un étirement de direction est-ouest. Il en est résulté un amincissement et la formation de plusieurs bassins d'effondrement allongés nord-sud : la Limagne étant le plus vaste et le plus profond (3000 m).

L'amincissement de la lithosphère, relativement rigide et cassante a d'autre part entraîné, avec un certain retard (à partir du Miocène, - 20 millions d'années), une remontée, sur plusieurs dizaines de kilomètres, de l'asthénosphère : partie plastique du manteau, proche de l'état de fusion, plus chaude et par conséquent plus légère que la zone mantellique située au dessus. La poussée d'Archimède correspondante est responsable du soulèvement du Massif Central et de son relief (Merle et al.).

La décompression de cette partie profonde du manteau, remontée par une sorte de "diapirisme" * jusqu'à une profondeur de cin-

* *diapirisme : mécanisme d'ascension d'un dôme de sel ou d'un magma par différence de densité*

quante kilomètres a :
- d'une part, permis sa fusion épisodique à l'origine d'un volcanisme d'âge mio-pliocène (Cantal, Mont-Dore, etc...) ou subactuel (Chaîne des Puys) ;
- d'autre part entraîné la libération permanente d'un flux important de dioxyde de carbone qui alimente les nombreuses sources minérales auvergnates mais dont la plus grande partie s'échappe du sol, de façon discrète et diffuse.
Le dioxyde de carbone mantellique provient principalement de la décomposition des sédiments calcaires marins, déposés sur la croûte océanique et entraînés avec elle par subduction* dans le manteau. Le CO_2 est ensuite dispersé par les circuits de convection et se trouve pour une part sous forme de carbonate de magnésium. Ce gaz est aussi présent dans la croûte inférieure et il est possible qu'une partie provienne de cette zone.

Grace à sa très forte pression initiale qui se chiffre en kilobars, et à sa faible viscosité, le gaz traverse la lithosphère. A l'approche de la surface, l'anhydride carbonique circule préférentiellement dans des roches à porosité de fractures ou d'interstices qui renferment souvent de l'eau d'infiltration dans laquelle il va se dissoudre pour constituer l'eau minérale carbogazeuse. L'attaque des minéraux silicatés (feldspaths notamment) de l'aquifère, par l'acide carbonique ainsi formé, est à l'origine de la charge en sels dissous qui atteint souvent plusieurs grammes par litre. Il s'agit principalement de bicarbonates de sodium, de calcium, de magnésium, de potassium, etc...

L'origine météorique de l'eau a été confirmée par l'étude de ses isotopes lourds ^{2}H et ^{18}O, qui peut même permettre de déterminer dans certains cas l'altitude de la zone d'infiltration. En effet, par rapport à l'eau de mer, l'eau de pluie s'appauvrit en isotopes lourds par le jeu des évaporations successives, à mesure de son avancée sur le continent et de l'altitude de ce dernier.

Solubilité du gaz carbonique dans l'eau

Pour bien comprendre le fonctionnement des sources intermittentes, il convient de se rappeler le comportement du gaz carbonique en présence d'eau. Ce gaz est très soluble. Il obéit, comme les autres gaz, à la loi de Henry qui stipule que la quantité de gaz dissous augmente à peu près proportionnellement à sa pression (pression partielle s'il s'agit d'un mélange gazeux) et diminue avec la température (fig. 2).

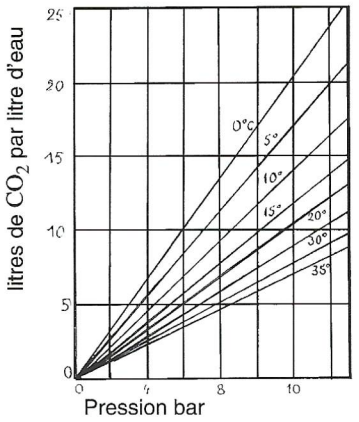


Fig. 2 : Solubilité du gaz carbonique dans l'eau en fonction de la pression.

Quelques chiffres permettront d'illustrer cette règle : ainsi un litre d'eau à la température de 15°C, peut dissoudre un litre de CO_2 pur à la pression atmosphérique (environ 1 bar). A la même température, mais avec une pression 20 fois plus forte, cette quantité s'élèverait à 16 litres.
Un litre d'eau minérale en bouteille contient habituellement entre 1,5 et 2 l de gaz réinjecté sous pression. Une bouteille de champagne renferme 5 à 6 l de gaz carbonique qui provient dans ce cas de la fermentation in situ des sucres, elle doit donc résister à une pression supérieure à 8 bars.
L'eau de pluie à 20°C, contient (Schoeller 1962) environ 19 cm^3 de gaz dissous : 65% d'azote, 33,6% d'oxygène et 1,4% de gaz carbonique. Par comparaison, l'air atmosphérique avec lequel cette eau se trouve en équilibre renferme : 78% d'azote, 21% d'oxygène et 0,03% de gaz carbonique; on constate ainsi, par rapport à l'azote, la très forte solubilité du CO_2, l'oxygène étant lui même un peu plus soluble.

Dégazage catastrophique de grands volumes d'eau saturés en dioxyde de carbone : l'exemple des lacs volcaniques africains

A deux ans d'intervalle, le 15 août 1984 et le 21 août 1986, le Cameroun a été endeuillé par deux catastrophes naturelles qui ont fait l'une 37 et l'autre 1700 victimes, asphyxiées par un flot de gaz carbonique brutalement échappé des lacs de Monoun et de Nyos. Des milliers d'animaux ont également péri dans les vallées envahies par le gaz mortel, une fois et demi plus dense que l'air.
Les deux lacs occupent des cratères volcaniques de type maar, creusés, à l'exemple du lac Pavin, par de multiples explosions qui résultent de la vaporisation brutale de l'eau souterraine par le magma à plus de 1000°C. Ils sont de forme tronconique, avec des parois fortement inclinées, une profondeur de 99 m à Monoun, 208 m à Nyos et un diamètre de 350 et 1000 m environ. Au fond des deux lacs existent très certainement des arrivées de dioxyde de carbone qui provient directement du manteau ou du dégazage d'un réservoir magmatique moins profond alimentant le volcanisme récent. Ce gaz, qui reste dissous dans l'eau, ne se manifestait pas ordinairement en surface.
En milieu aquatique, la pression augmente d'environ 1 bar tous les 10 m et, avec la pression la quan-

** subduction : mécanisme de la tectonique des plaques qui correspond à l'enfoncement de la lithosphère océanique sous un continent.*

tité de CO_2 dissous s'accroit également. La limite de solubilité atteint ainsi 11 litres de CO_2 par litre d'eau au fond du lac Monoun et 15 litres au fond du lac Nyos pour une température de 20° C. Les eaux de ces lacs, situés en climat tropical, sont à une température à peu près constante, voisine de 20°C, tout au long de l'année et aux différentes profondeurs (lac méromictique), en raison de l'absence de convection thermique saisonnière et de la forme du lac. La concentration en CO_2 augmente donc régulièrement avec la profondeur et aussi dans le temps en raison de l'apport incessant de gaz par le fond. Le faible accroissement de la densité de l'eau en fonction de la quantité de gaz dissous favorise d'ailleurs la stabilité et la stratification des eaux du lac. A l'approche de la limite de saturation, il suffit d'une cause minime perturbant l'équilibre hydrostatique ou thermique pour déclencher la libération de la majeure partie du gaz en solution : léger éboulement des parois*, baisse de la pression atmosphérique, forte chute de pluie froide (les pluies saisonnières sont particulièrement abondantes au mois d'août, période où se sont produites les deux catastrophes).

Les premières bulles formées grossissent en s'élevant dans le liquide, lui même partiellement entraîné dans le mouvement. Cette décompression des deux fluides favorise la multiplication et la croissance des bulles et la tranche d'eau supérieure se transforme rapidement en une émulsion de densité nettement inférieure à 0,5, ce qui a pour effet de diminuer la pression dans la partie profonde du lac qui va se dégazer rapidement à son tour. Cette réaction en chaîne produit une véritable éruption carbogazeuse. La quantité de gaz ainsi libéré brutalement au lac Nyos a été estimée à au moins trente millions de mètres cubes (certains auteurs avancent des chiffres 20 fois plus élevés). Le temps nécessaire pour cette accumulation, à débit constant, est de 10 ans à 100 l/s ou de 100 ans à 10 l/s.

Aprés ces deux événements dramatiques, des études et des mesures de contrôle ont été réalisées pour déterminer la composition de l'eau aux différentes profondeurs. Un système de purge du CO_2 résiduel a même été mis au point au lac Nyos pour éviter le retour de concentrations dangereuses. Pour cela, à partir d'un radeau flottant sur le lac, de longs tuyaux ont été immergés verticalement. Après amorçage par une pompe, ils ont craché spontanément et de manière continue, un jet d'eau gazeuse émulsionnée, atteignant jusqu'à 20 m de hauteur, et correspondant au dégazage de la partie profonde du lac.

Plusieurs lacs de cratère existent dans le Massif Central, et la Délégation aux Risques Majeurs s'est préoccupée en 1986 de l'évaluation du risque d'éruption gazeuse carbonique. Le Centre de Recherches Volcanologiques de Clermont-Ferrand (Observatoire de Physique de Globe et URA 10 du CNRS) a été ainsi chargé d'une étude physico-chimique de l'eau du lac Pavin qui paraissait plus particulièrement susceptible de présenter ce type de risque. Les conclusions de cette étude (Camus et al., 1993) sont rassurantes en raison des très faibles teneurs en CO_2 mesurées au fond du lac.

Le gaz carbonique dans les mines de Pranal et Barbecot

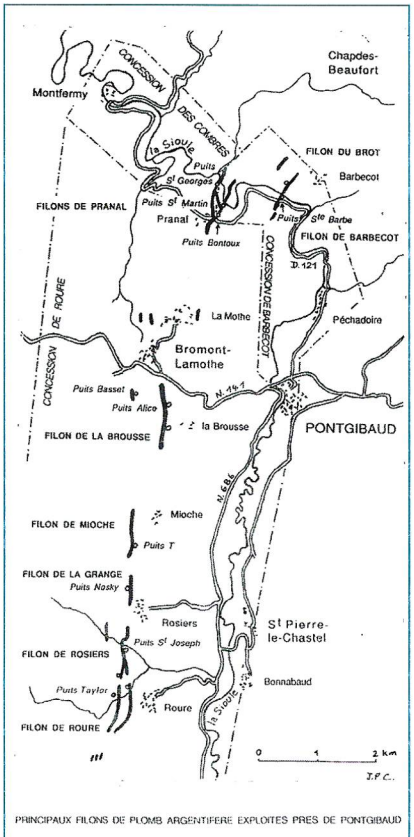
Les filons de galène argentifère de Pranal et de Barbecot recoupent la vallée de la Sioule et appartiennent à un ensemble connu sous le nom de mines de Pongibaud (fig. 3), exploitées principalement au dix-neuvième siècle. Dans cette partie de la vallée existent plusieurs sources minérales et les travaux miniers ont été fortement gênés par des venues abondantes de gaz carbonique. A Pranal, d'après les rapports de visite des ingénieurs des mines, "le gaz s'échappait en sifflant par les fentes du rocher et par les parties géodiques des filons", dans les galeries inférieures.

Malgré l'installation d'une ventilation efficace, au moins trois mineurs ont trouvé la mort par asphyxie à Pranal et Barbecot. Après l'abandon définitif de l'exploitation en 1897 et le comblement des puits, de l'eau minérale gazeuse et très ferrugineuse continue de bouillonner de manière spectaculaire au puits Sainte-Barbe à Barbecot . Plus en aval, les eaux gazeuses de la mine de Pranal s'écoulent en abondance sous une petite construction située au bord de la Sioule, en contrebas du puits Saint-Georges.

Le Puy Sainte-Barbe
Photo : J.P. Couturié

Cette dernière mine, qui a été temporairement abandonnée pendant dix ans entre 1845 et 1855 à la suite de son inondation, a été le siège d'éruptions carbogazeuses périodiques et peu connues. Elles méritent d'être rapportées en détail car elles font le lien entre les catastrophes lacustres qui viennent d'être évoquées et les sources intermittentes plus classiques. A cette époque, le puits Saint-Georges n'existait pas encore et l'extraction du minerai ainsi que l'exhaure se faisaient uniquement à partir du puits Saint-Martin (80 m), à l'aide de deux roues hydrauliques alimentées par un long canal de dérivation de l'eau de la Sioule. Une troisième

* *les légendes de l'Antiquité évoquent un lac dans lequel le jet d'un caillou déclenchait une tempête.*



PRINCIPAUX FILONS DE PLOMB ARGENTIFERE EXPLOITES PRES DE PONTGIBAUD

Fig. 3 : Principaux filons de plomb argentifère exploités près de Pontgibaud.

roue était réservée au ventilateur qui aspirait l'air chargé de CO_2 dans un tuyau métallique installé dans le puits.

D'après Rivot et al. (1850) :

"L'eau s'élève maintenant jusqu'à l'orifice du puits (Saint-Martin); elle est acide et donne sur le sol un dépôt ferrugineux abondant.

L'acide carbonique vient constamment se dégager à la surface en bulles nombreuses, et produit par intervalles une véritable ébullition. Le bouillonnement est surtout violent, quand par curiosité on met les pompes en mouvement (les tiges des pompes créant un brassage de l'eau); quelquefois le dégagement d'acide carbonique donne lieu à des explosions qui projettent de grande masses d'eau jusqu'à plus de 10 mètres de hauteur. Une de ces explosions a soulevé la toiture du bâtiment, cependant fort élevée au dessus du puits....."

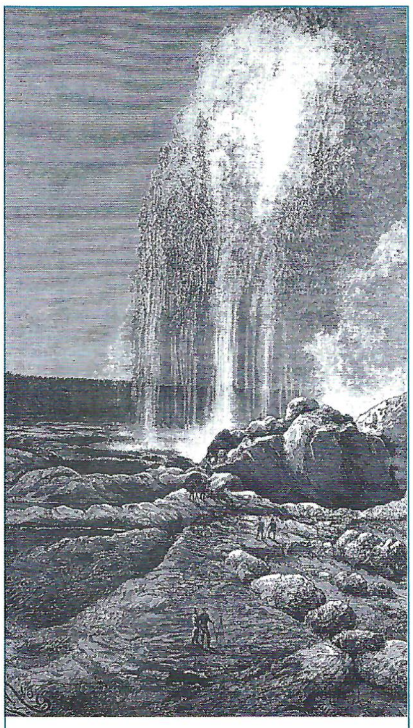
"Au moment de ces dégagements abondants, le gaz se répand jusqu'à une certaine distance dans la vallée, et forme, quand l'air n'est pas agité, une couche de plusieurs décimètres de hauteur. Ce phénomène a causé déjà plusieurs accidents : à la suite d'un dégagement assez violent d'acide on a trouvé un cheval mort asphyxié dans son écurie, distante cependant de plus de 100 mètres du puits."

Cette description est confirmée avec plus de détails par Fournet, ancien directeur des mines de Pongibaud :

"Pendant certaines journées, on s'aperçoit à peine de la présence de l'acide carbonique dans l'intérieur des mines de Pranal et de Barbecot. En d'autres temps, les jets s'effectuent avec le bruit du tonnerre. Dans un puits de Pranal, approfondi jusqu'à 90 mètres, actuellement abandonné et complètement rempli d'eau, il arrivait presque tous les mois qu'une agitation commençait à se manifester dans la colonne liquide. D'abord animée d'un mouvement presque insensible, ensuite frémissante et devenant mousseuse au bout de quelques heures, elle était lancée par explosion comme le vin de Champagne hors d'une bouteille et le puits se trouvait débarrassé de son contenu. La projection atteignit même un jour à un degré de violence tel, que la toiture du puits fut enlevée; des torrents de gaz se répandirent dans la vallée, asphyxiant un cheval dans son écurie et les oies qui nageaient sur la rivière; le maître mineur, averti par l'odeur, eut à peine le temps de s'enfuir de son habitation et d'échapper au danger en grimpant sur la berge voisine."

Une troisième version du phénomène, encore plus précise et qui a fait l'objet d'une communication à l'Académie des Sciences, est donnée par M. Pallu, successeur de M. Fournet à la direction des mines, tous les deux cités par Lecoq (1865) :

"Tous les mois environ, on voit l'eau contenue dans le puits éprouver un léger frémissement qui se témoigne au bout de quelques heures par une très forte et très bruyante agitation de toute la masse; le gaz acide carbonique commence à se dégager en très grande abondance, puis vient ensuite une éruption d'eau considérable, qui ne cesse que quand le puits s'est vidé jusqu'à une profondeur de 10 à 15 mètres (83 à 125 m3). Ce puits a de section 3m 66 sur 2m 33. La masse de gaz est assez considérable pour combler pendant quelques instants une portion de la petite vallée; mais un fait remarquable, c'est que l'eau ne jaillit pas par l'orifice du puits dès le début : elle prend d'abord son issue par le tuyau du ventilateur qui a 0m 33 de section et qui descend jusqu'au fond du puits. Le coude qui joint ce tuyau au ventilateur a été brisé, et l'eau par cette issue forme un jet qui n'a pas moins de 35 à 40 pieds d'élévation. Le phénomène dure de 15 à 20 minutes, avec des intermittences répétées de quelques secondes. Les trappes qui couvrent une partie du puits sont agitées violemment, puis tout rentre en repos pour recommencer le mois suivant".



Le Vieux -Fidèle.

Ces descriptions rappellent à une échelle plus réduite ce qui s'est passé au lac Nyos dont la période d'intermittence n'est pas déterminée, en l'absence d'antécédents connus ou de mesure de flux du gaz au fond du lac.
J'ai pu évaluer à Barbecot le débit de l'eau minérale qui s'écoule régulièrement du puits : environ 1 litre par seconde, et celui du CO_2 en immergeant partiellement une petite piscine gonflable retournée sur le puits et raccordée à un compteur à gaz volumétrique. En ajoutant aux 2 litres de gaz spontané ainsi comptés, 0,8 litre de gaz libre dissous mesuré avec l'appareil de Karat, on obtient environ 3 litres par seconde de CO_2 .
On peut considérer que le débit de gaz est du même ordre de grandeur à Pranal où les mesures sont plus difficiles à réaliser. Dans ces conditions, au cours du temps de recharge du système entre deux éruptions mensuelles, 7800 m^3 de gaz dissous pourraient s'accumuler dans l'eau du puits et surtout dans les étages inférieurs de galeries noyées. Ce volume correspond à une nappe de CO_2 pur qui aurait pu théoriquement envahir la vallée de la Sioule, large de 10 mètres, sur une longueur de plus de 700 mètres et une hauteur de 1 mètre.
Pour rassurer les pêcheurs à la ligne, signalons que ce risque n'existe pratiquement plus. Les puits et une grande partie des galeries ont été comblés ou remblayés ce qui réduit considérablement le volume d'eau susceptible de retenir temporairement le CO_2 et, depuis plus d'un siècle, les sources des bords de la Sioule évacuent de manière paisible leurs bulles de gaz.

Quelques exemples de sources intermittentes régionales

Les sources minérales intermittentes auxquelles on pense habituellement fonctionnent sur le même principe que les dégazages violents qui viennent d'être évoqués, mais avec des périodes beaucoup plus courtes qui varient de quelques minutes à quelques heures, le volume du réservoir étant très réduit. Ce sont très rarement des émergences naturelles mais plutôt le résultat de forages. Certains forages destinés à la production d'eau minérale ont commencé à fonctionner de cette manière. Armand (1934) cite, dans le bassin de Vichy, l'exemple des sources du Dôme, des Lys et Cornélie; leur débit a pu être ensuite régularisé en installant un tube siphoïde, de diamètre plus petit mais croissant avec la profondeur, à l'intérieur de la colonne ascensionnelle.
La source intermittente de **Bellerive-sur-Allier** (encore appelée source de Vesse) a été maintenue volontairement dans cet état pour constituer une attraction touristique au centre même de l'agglomération. Elle correspond à un forage de 110 m de profondeur et de 15 cm de diamètre, réalisé en 1844 dans la région de Vichy. Depuis cette date, elle a fonctionné avec une période qui a varié dans le temps : moins de 1 heure entre 1853 et 1865, environ 9 h en 1868, 3 h en 1970. Depuis, le cycle s'est progressivement allongé pour atteindre actuellement environ 5 h, soit 4 h de repos et un peu moins d'une heure pour le jaillissement qui ne dépasse pas une hauteur de 1,20 m. Ces variations au cours des années sont difficiles à interpréter, car elles peuvent être dues à des causes multiples :
- modifications volontaires de l'équipement du forage (changement de diamètre du tubage intérieur et de l'ouverture sommitale);
- corrosion entraînant la perforation du tubage au dessus de la partie crépinée ou, au contraire, incrustation de carbonates réduisant le diamètre;
- création de vides dans les terrains encaissants (par dissolution chimique des niveaux calcaires et expulsion de sable et d'argile à chaque éruption), suivie d'éboulements à plus ou moins long terme;
- modifications dans l'alimentation en eau ou en gaz carbonique.
Cette source de Bellerive qui a déjà été décrite par plusieurs auteurs (Bouquet, 1855; Daumas, 1880; Armand, 1934) a été étudiée récemment dans le cadre d'un mémoire de Maîtrise en géologie (TER 1997) par Martine Vincent. Il apparaît que pendant la période de repos, le niveau se stabilise entre 4 et 5 m de profondeur, sans débit de gaz perceptible pendant 3 h 30 (période de recharge en CO_2). Ensuite, un gargouillis qui va en s'amplifiant se fait entendre pendant près d'une heure. Il s'accompagne d'une très lente remontée du niveau qui s'accélère dans les 10 minutes qui précédent le jaillissement.
La Gargouillère, autre source intermittente, se trouve près de Saint-Georges-sur-Allier (Puy-de-Dôme), entre Lignat et Busséol, dans une petite dépression. Je l'ai examinée plusieurs fois et j'ai aussi bénéficié des compléments d'observation de Martine Vincent et d'un groupe d'étudiants des classes préparatoires. Ici pas de forage, mais un puits en briques de 0,40 m d'ouverture, de profondeur indéterminée, en grande partie rempli de graviers et recouvert par une ancienne meule de moulin située au ras du sol.
Vers 1960, l'intervalle entre deux jaillissements était d'environ 8 minutes. Depuis la durée du cycle s'est allongée et varie très irrégulièrement entre une vingtaine de minutes et plus de deux heures. Les plus violentes éruptions, qui se produisent souvent à la fin des cycles courts, s'élèvent à 0,30 m au dessus de l'ouverture centrale de la meule. Pendant la phase de repos, l'eau disparaît rapidement en dessous des graviers situés à 0,60 m de profondeur. Le bruit de gargouillement dû à l'échappement du gaz, qui ne cesse jamais complètement, à la différence de la source de Vesse, permet de

situer le niveau le plus bas de l'eau vers 4 ou 5 m de profondeur. Le niveau remonte ensuite très lentement, tandis que le bruit s'amplifie jusqu'au débordement suivant.

Deux conduits parasites s'étaient ouverts autour de la meule jusqu'au niveau du sol; leur obstruction n'a pas régularisé le fonctionnement de la source qui continue de se dégrader inexorablement avec le temps. C'est d'ailleurs le sort habituel de ce type d'émergence : leur mode de fonctionnement saccadé entraînant une érosion du terrain en profondeur et l'éboulement des conduits et des cavités annexes qui contribuent à la complexité du phénomène.

Un autre exemple particulièrement spectaculaire correspond au **geyser des Martres d'Artières** qui a existé à la fin de 1919. Il a été décrit par Philippe Glangeaud (1920), professeur à l'Université de Clermont et chargé de l'étude géologique de ce forage destiné à la recherche du pétrole. Le 13 novembre, à 415 m de profondeur, après avoir traversé deux niveaux de bitumes dans les marnes oligocènes,

"la sonde pénétra dans une nappe d'eau minérale à 31°C qui jaillit violemment à l'extérieur, sous l'action de l'acide carbonique qu'elle renferme.

La projection s'éleva d'abord à 15 m du sol, puis, durant quelques jours, le jaillissement fut irrégulièrement intermittent pour reprendre 5 fois de suite une ampleur de plus en plus grande, comme hauteur et comme débit.

Le 20 décembre, à minuit, une violente explosion réveilla les habitants des villages voisins. Après un repos de 3 jours, sous la poussée de l'acide carbonique, le geyser fonctionnait de nouveau et projetait à l'extérieur une tige de sonde, de 180 m de long, pesant environ 2 tonnes et demie, que l'on avait descendue dans le trou pour reprendre le travail. Le jaillissement cette fois ne dura que 8 heures. Après un nouveau repos de 4 jours, il reprit avec une plus grande violence. L'eau minérale qui émergeait ainsi brusquement d'une profondeur de 415 m., d'abord limpide, se troublait rapidement par la transformation à l'air de plusieurs de ses sels et elle entraînait avec elle une notable quantité de bitume, de sables et d'argiles, provenant des couches qu'elle désagrégeait en route et qu'elle accumulait autour de l'édifice du sondage comme autour du cratère d'un volcan.

La tour de sondage, la machinerie et les arbres du voisinage furent bientôt incrustés d'une couche de carbonate de chaux blanchâtre, qui donnait au paysage un aspect hivernal. L'activité se maintint constante pendant 9 jours et 8 heures et cessa le 3 janvier pour redevenir intermittente après quelques heures.

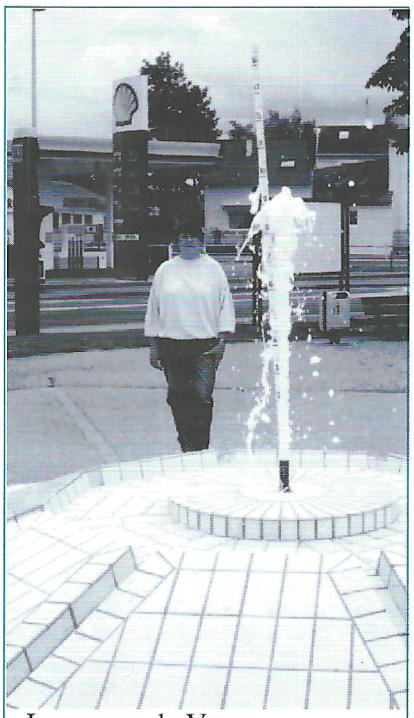
Après 21 jours de repos, le 27 janvier, l'activité geysérienne reprit par une violente projection de gaz, de bitume et d'eau minérale. L'eau sortait par la tige de sondage et entre la tige et la colonne, ce qui diminuait le débit. Dès qu'on put enlever la tige, le débit redevint considérable (80 litres par seconde). Le 28 février nouvel arrêt du geyser après des intermittences de plus en plus affaiblies et une agonie de 2 jours et enfin descente de l'eau dans le trou de sonde, à 150 mètres du jour....."

Après toutes ces péripéties, qui avaient conduit à la formation d'un gigantesque plat de spaghettis métalliques autour du forage, la suite de l'histoire nous apprend (Armand 1934) que l'écoulement était devenu continu, avec un débit de 500 l/min, après la réduction du diamètre du tubage intérieur (80 mm au lieu de 280 mm initialement). Ce forage a été exploité pour le CO_2 par la société la Carbonique du Centre. Après son abandon, un vingtaine d'années plus tard à la suite de son entartrage, il a été suivi de deux autres forages pour le gaz, dans le voisinage.

Un autre geyser a existé temporairement lors des travaux de recaptage des sources de Saint-Nectaire au début de 1982. et un autre à Royat, plus récemment, pour le recaptage de la source Eugénie. Il s'en produit aussi quelquefois dans la ville de Clermont-Ferrand, dont le sous-sol est gorgé d'eau minérale, entre la place de Jaude et le quartier des Salins, à l'occasion de sondages de reconnaissance pour l'implantation de nouveaux immeubles.

Des forages qui soufflent le chaud et le froid

Sur le plan anecdotique, on peut citer une dernière "diablerie" imputable au gaz carbonique auvergnat et qui m'a été rapportée par mon collègue Daniel Chaillou, ingénieur géologue, responsable du suivi géologique du forage. C'était en septembre 1981. La crise du pétrole avait relancé une campagne de forages profonds en Limagne, autant pour exploiter une possible ressource géothermique destinée au chauffage urbain que pour rechercher la précieuse huile. Le susnommé se trouvait en compagnie de deux foreurs sur la plate-forme, haute de 3 m et surmontée par le derrick installé près de Cébazat, quand la sonde rencontra, vers 1020 m de profondeur, une importante venue de dioxyde de carbone. La sortie du gaz qui s'échappait par le tubage avec une pression et un débit énormes (4000 m^3/h), produisit un vacarme assourdissant, analogue à celui d'un réacteur d'avion au décollage. La brusque détente transforma le fluide en neige car-



La source de Vesse Bellerive/Allier

Photo : J.P. Couturié

bonique. Celle-ci s'accumulait très rapidement autour de la plate-forme, sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres, isolant les trois naufragés qui , à défaut d'être asphyxiés, étaient menacés d'être engloutis par la montée de cette marée de ouate blanche, et congelés à -78,5°C (température de sublimation du CO_2 à la pression atmosphérique). Ils avaient déjà de la neige au dessus des bottes quand la vanne salvatrice put être fermée.

Les geysers à eau bouillante

Le mot geyser est dérivé du verbe *gjose* qui signifie : jaillir, faire éruption, dans l'ancien vocabulaire islandais.

On connaît quelques centaines de geysers dans le monde, en Islande bien sûr, mais les plus nombreux (environ 200) se trouvent dans le parc de Yellowstone aux USA dont le célèbre Old Faithful qui expulse pendant 10 minutes un jet d'eau bouillante et de vapeur à 50 m de hauteur à peu près toutes les heures; il en existe, également en Nouvelle Zélande, au Kamtchatka et en d'autres lieux encore.

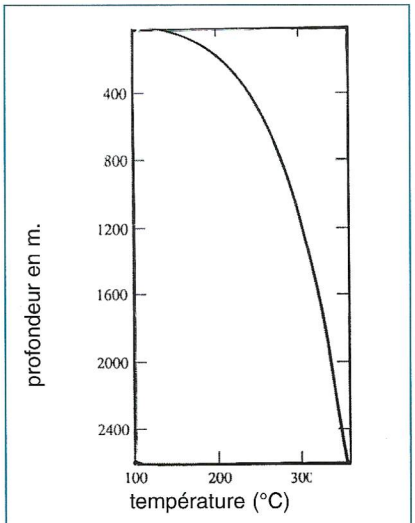
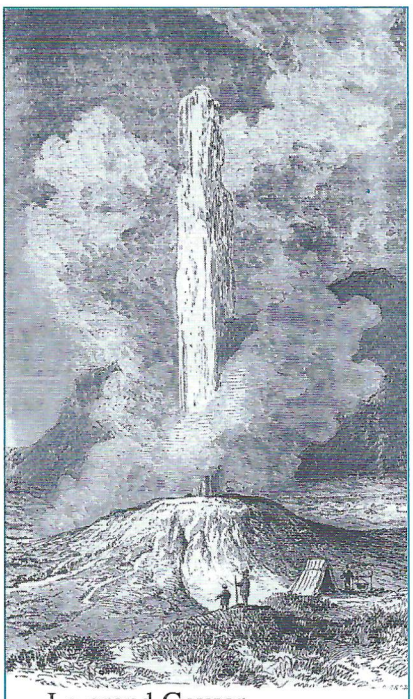


Fig. 4 : Température d'ébullition de l'eau en fonction de la profondeur.

Ces phénomènes ne s'observent que dans les régions où existe un flux de chaleur anormalement élevé, lié à l'intrusion de corps magmatiques à faible profondeur (quelques kilomètres).

Les geysers, correspondent à un délicat équilibre thermique entre les banales sources chaudes, et les nombreuses fumerolles qui produisent de la vapeur en permanence dans ces régions, aussi sont-ils relativement rares.



Le grand Geyser de l'Islande (1880).

Le fonctionnement des geysers tient au fait que la température d'ébullition de l'eau augmente avec la pression (fig.4), c'est à dire avec la profondeur dans le réservoir. Dans les premiers mètres, cet accroissement est de 2 à 3°C par mètre.

Le réchauffement de l'eau s'effectue habituellement par le fond et la température augmente régulièrement vers le bas à partir de la surface. Cette disposition entraîne une instabilité du système : la densité diminuant avec la température, l'eau devient plus légère en profondeur et tend à remonter, ce qui provoque son ébullition. Comme dans les sources intermittentes carbogazeuses, les premières bulles diminuent la densité de la tranche d'eau qu'elles traversent, ce qui produit une réaction en chaîne par baisse de pression dans les niveaux inférieurs.

Les geysers à eau bouillante ont une potentialité en gaz propulseur beaucoup plus forte que ceux qui fonctionnent au gaz carbonique (1g d'eau produisant 1500 cm^3 de vapeur); à noter qu'un explosif comme la poudre noire produit environ 600 fois son propre volume de gaz de combustion, c'est presque trois fois moins. L'énergie correspondante (chaleur latente de vaporisation : 540 kJ/kg), est essentiellement empruntée au liquide et la quantité de vapeur produite dépend donc de la température de surchauffe par rapport à la température d'ébullition. Le calcul indique (Rinehart 1980) que pour une ébullition à 100°C : 1,87% de l'eau à 110°C peut être vaporisée, 5,45% à 130°C, 10,5% à 160°C et 33,7% à 310°C.

L'éruption s'arrête par épuisement de l'eau ou de la chaleur disponible.

Plutôt que par conduction directe, procédé peu efficace - les roches ayant une chaleur massique cinq fois plus faible que celle de l'eau - la réalimentation et le réchauffement du système se réalise par convection, c'est à dire par des arrivées fissurales d'eau très chaude provenant de zones plus profondes. Celle-ci se mélange avec des apports d'eau plus froide, ce qui retarde le déclenchement de l'éruption suivante.

Chaque geyser est différent des autres, ses caractéristiques dépendent de son mode d'alimentation, du volume et de la forme du réservoir : simple conduit vertical débouchant directement en surface ou dans un petit lac, ou encore cheminée plus large, de forme irrégulière avec des rétrécissements, et éventuellement des cavités annexes.

Comme les autres sources intermittentes, les geysers ont une durée d'existence limitée en raison de leur "vie trépidante". Tous les deux sont sensibles aux variations de la pression atmosphérique : une baisse du baromètre raccourcit légèrement le cycle.

Pour conclure, on peut dire que les sources intermittentes et les geysers, tout comme les tremblements de terre et les éruptions volcaniques, qui sont d'une autre

ampleur, correspondent à la libération spectaculaire et parfois catastrophique, à intervalles de temps plus ou moins réguliers, de fluides et/ou d'énergie, patiemment et discrètement accumulés sous nos pieds.
Tous ces phénomènes nous rappellent, à notre échelle de temps, que la Terre est une planète "vivante," encore en pleine évolution, qui évacue, en partie de cette manière, son trop-plein d'énergie tiré de la radioactivité naturelle.

Bibliographie

ARMAND, L (1934) - Étude des sources gazeuses et particulièrement des sources obtenues par forage dans le bassin de Vichy.
Ann. Institut d'Hydrogéologie et de Climatologie, t. IX, fasc. 2, n° 32.

ARTHAUD, F. , DAZY, J. et GRILLOT, J.C. (1994) - Distribution of deep carbon dioxide in relation to the structure and tectonic evolution of south-east France.
Geodinamica Acta (Paris) , 7, 2, 86-102

BATARD, F., MAISONNEUVE, J. et RISLER, J.J. (1978) - La province hydrominérale des eaux carbogazeuses d'Auvergne.
Rev. Sc. Nat. d'Auvergne, vol 44.

BOUQUET, J (1855) - Histoire chimique : Eaux minérales et thermales de Vichy, Cusset, etc...
Masson ed.

CAMUS, G. , MICHARD, G. , OLIVE, P., BOIVIN, P., DESGRANGES, P., JEZEQUEL, D., MEYBECK, M., PEYRUS, J.C., VINSON, J.M., VIOLLIER, E. et KORNPROBST, J. (1993) - Risques d'éruptions gazeuses en Auvergne - .
Bull. Soc. géol. France, t. 164, n° 6, pp. 767-781.

COUTURIÉ, J.P. (1995) - Techniques minières et métallurgiques utilisées dans les anciennes mines de plomb argentifère de Pontgibaud (Puy de Dôme)
La Route des Mines ed., brochure, 9 p.

DAUMAS, C. (1880) - Les sources de Vichy
Ed. Imprimerie Wallon, Vichy.

GLANGEAUD, Ph (1920) - Le geyser des Martres d'Artières (Puy de Dôme).
Comptes Rendus Acad. Sc. Paris t.170, p. 888, séance du 12 avril 1920

LECOQ, H. (1865) - Les eaux minérales du Massif central de la France.
Rothshild ed.

MAISONNEUVE, J. et RISLER, J.J. (1974) - Le gaz carbonique hydrothermal en Auvergne.
Rev. Sc. Nat. d'Auvergne, vol. 40, pp.27-47

MERLE, O., MICHON, L., CAMUS, G. & DE GOER, A.
L'extension oligocène dans le rift du Massif Central
Bull. Soc. Géol. Fr. sous presse

RINEHART, J. S. (1976) - A guide to geyser gazing
Hyperdynamics, Santa Fe, New Mexico

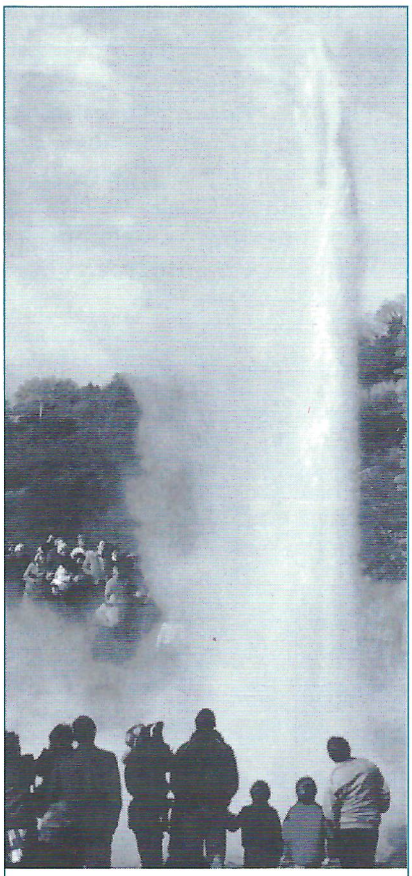
RINEHART, J. S. (1980) - Geysers and geothermal energy
Springer-Verlag ed.

RIVOT, M., et ZEPPENFELD, M.,(1850) - Description des gîtes métallifères, de la préparation mécanique et du traitement métallurgique des minerais de plomb argentifères de Pontgibaud _
Ann. des Mines, 9ème série, t. 1, pp. 389-505.

SCHOELLER, P. (1962) - Les eaux souterraines. -
Masson ed.

VINCENT, M.(1997) - Sources intermittentes : Vesse, la Gargouillère
T.E.R : Mémoire de Maîtrise en Sciences de la Terre.; 19 p et annexes
Université Blaise Pascal.

WHITE, D.E. (1967) - Some principles of geyser activity mainly from Steamboat Springs, Nevada; Amer. J. Sci., 265, 641-684.



Le geyser de St-Nectaire
Photo : P. Vincent

***Monsieur Jean-Pierre COUTURIÉ** reprendra les thèmes de cet article au cours d'une conférence qui sera organisée par l'ADASTA en octobre 1998.*

Les Glacières Naturelles

Roland Jouanisson

Roland Jouanisson, ancien maître de conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, a été directeur scientifique de l'ADASTA depuis sa création jusqu'en 1997.

Certains phénomènes naturels ont, de tout temps impressionné les hommes : que l'on songe à la foudre, aux aurores boréales, à l'arc-en-ciel....

D'autres phénomènes, d'apparence paradoxale, ne manquent pas d'intriguer encore nos contemporains ; c'est le cas, par exemple, des **glacières naturelles (ou "trous à glace")** que l'on rencontre parfois dans des grottes : on y voit se former de la glace en été, pendant les fortes chaleurs qu règnent à l'extérieur.

De nombreuses glacières naturelles ont été signalées, notamment par les voyageurs du siècle dernier : en Autriche, en Slovénie, dans les steppes des Kirghises, etc... En France même, ces glacières ne sont pas rares : on peut accéder à celle de la Grâce-Dieu dans le Doubs, à celles de Corrençon et de la Font d'Urle dans le Vercors ; d'autres ont été signalées dans les Pyrénées. Près de Clermont-Ferrand, on trouve de telles grottes dans les coulées de lave que les Auvergnats appellent des **"cheires"**: l'une est visible près du lac de La Cassière (Cheires des puys de la Viche et Lassolas), d'autres se trouvent dans la cheire de Côme, près de Pontgibaud.

La glacière de Pontgibaud, située plus précisément dans les bois de Violaine est connue depuis longtemps. si l'on en croit Abraham Golnitz, originaire de Dantzig, qui parcourut la France entre 1628 et 1631 et qui nous a laissé un récit détaillé et précis de ses propres observations (ce qui n'est pas chose courante à l'époque !), il existe dans la "montagne de Côme" une "cave de glace, fontaine vraiment remarquable, dont l'eau, dans les mois d'août et de juillet, se congèle fortement et ne gèle pas en hiver" (1). Golnitz précise que "beaucoup ont fait la description de cette fontaine" qui était donc déjà bien connue à l'époque. Montaigne qui passa à Pontgibaud le 20 novembre 1581 n'en fait pas mention : il est vrai qu'il avait d'autres soucis avec une pierre "ni molle ni dure", qui vint choir en la vessie ce jour-là. De plus, "il faisait tant de neige et le temps si âpre de vent froid, qu'on ne voyait rien du pays" ! (2).

Entrée de la glacière naturelle de Vergy, dans la vallée du Reposoir (Haute-Savoie). - Dessin de Karl Girardet, d'après M. Thury.

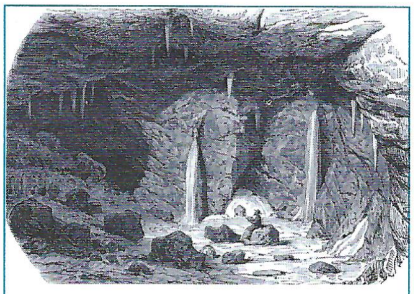
Un peu de physique

Comment expliquer ce phénomène paradoxal : la formation de glace en été ? Il nous faut faire appel pour cela à quelques notions de physique.

Tout le monde a remarqué qu'un bloc de glace, même exposé au soleil, fond très lentement, surtout s'il est enveloppé dans un papier mouillé. La cause en est que pour faire passer un corps de l'état solide à l'état liquide (sans changement de température) il faut lui fournir une quantité de chaleur (chaleur latente de fusion).

De même, il faut fournir une quantité de chaleur pour faire passer de l'état liquide à la vapeur. Par exemple, à 100 °C, sous la pression normale, la vaporisation d'une masse d'eau liquide exige une quantité de chaleur environ 540 fois plus grande que celle qui est nécessaire pour élever la température de 1°C de la même masse d'eau liquide prise à la température ambiante. La vaporisation de l'eau, quelle que soit la température à laquelle elle se produit, absor be beaucoup de chaleur qu'elle prélève dans le milieu ambiant qui se refroidit ainsi. Cette propriété permet d'expliquer un certain nombre de phénomènes courants : lors des fortes chaleurs, notre organisme se protège en éliminant de la sueur qui, en s'évaporant, rafraîchit la peau. Tout le monde savait, avant l'existence des réfri-

gérateurs, que pour rafraîchir l'eau, il suffisait de la placer dans un récipient poreux (par exemple les alcarazas des pays chauds) et de favoriser son évaporation dans un courant d'air. Il nous faut rappeler ici quelles sont les circonstances qui influent sur l'évaporation d'un liquide : celle-ci augmente avec la température ; elle dépend aussi de la proportion de vapeur dans l'atmosphère ambiante : l'évaporation augmente lorsque cette proportion de vapeur diminue ; il en résulte que, si on maintient cette pression partielle faible en éliminant la vapeur produite, on accélère l'évaporation. De plus, l'évaporation augmente avec la surface de liquide avec l'atmosphère.



Vue intérieure de la glacière naturelle de Vergy. - Dessin de Karl Girardet, d'après M. Thury.
Illustrations extraites de "Le magasin pittoresque". Edouard Charton - Paris 1864.

Ces propriétés permettent d'expliquer pourquoi un courant d'air qui déplace la vapeur produite rafraîchit une peau couverte de sueur, pourquoi le linge sèche plus vite en cas de vent sec, pourquoi il arrive qu'un carburant gèle,... et pourquoi on observe des glacières naturelles en été. En effet, des différences de températures importantes existent entre l'intérieur et l'extérieur des grottes, ce qui génère des courants d'air. Si l'atmosphère de la grotte est très humide, l'eau se dépose sur les parois froides. Dans certains cas la nature de la paroi, plus ou moins poreuse (comme c'est le cas des roches des cheires auvergnates) offre une grande surface d'évaporation, de sorte que l'eau évaporée prélève beaucoup de chaleur dans le milieu ambiant et en particulier, dans l'eau disponible. Une partie de l'eau est alors susceptible de se congeler. cette opération est facilitée par le fait que la chaleur latente de solidification (qui est égale à la chaleur latente de fusion) est environ 7 fois plus faible que la chaleur latente de vaporisation : ainsi, une masse d'eau en se vaporisant permet, théoriquement, la congélation d'une masse beaucoup plus grande d'eau et ce, malgré les échanges thermiques avec le milieu extérieur qui se produisent inévitablement.

R. Jouanisson

Une expérience

Utiliser un thermomètre à dilatation projetable (à l'aide d'un rétroprojecteur). Entourer le réservoir du thermomètre d'un manchon poreux (coton hydrophile, par exemple) imbibé de liquide (éther, alcool, eau...). avec l'éther, le résultat est spectaculaire mais l'odeur risque de ne pas être tolérée (généralement l'odeur d'alcool est mieux acceptée !). Montrer le refroidissement du liquide. Le refroidissement est accéléré lorsqu'on dirige sur le manchon un flux d'air (sèche-cheveux par exemple). Même avec un flux d'air chaud on peut constater un refroidissement !

ATTENTION DANGER !

L'industrie chimique, affirmait le texte d'un récent sondage (proposé par le très sérieux "European Science and environnement Forum), utilise en quantités importantes un composé chimique appelé dihydrogène monoxyde. Ce composé est à l'origine de fuites et d'infiltrations fréquentes, et se retrouve régulièrement dans les rivières et la nourriture animale et humaine. Il est connu pour avoir les effets suivants sur l'environnement et la santé :
1 - c'est un composant majeur des pluies acides,
2 - à l'état gazeux, il contribue à l'effet de serre,
3 - il peut être mortel s'il est inhalé accidentellement
4 - on le retrouve en quantité significative dans les tumeurs cancéreuses.
Estimez-vous, interrogeait le sondage, que ce composé chimique est dangereux et que son utilisation doit être réglementée, voire interdite dans l'union européenne ? A cette question, 76 % des personnes interrogées ont répondu oui, 19 % ne se prononcent pas, 5 % seulement ont reconnu qu'il s'agissait de l'eau et évité le piège.
Cette histoire montre combien il est facile d'inquiéter l'opinion, la peur naît souvent de l'ignorance.

D'après un article de "Pour la Science, n° 241, novembre 1997 (page 9)" : Jean-Jacques DUBY, risques réels et risques négligeables.

(1) Voir Le Voyage en France, tome 1, Collection Bouquins, Robert Laffont, 1995.
(2) Journal de Voyage en Italie, Edition la Pleîade, Gallimard, 1962.

VOLVIC, DES PIERRES, DES VOLCANS ET DES SOURCES

Jocelyne ALLEE
Agrégée de Sciences Physiques

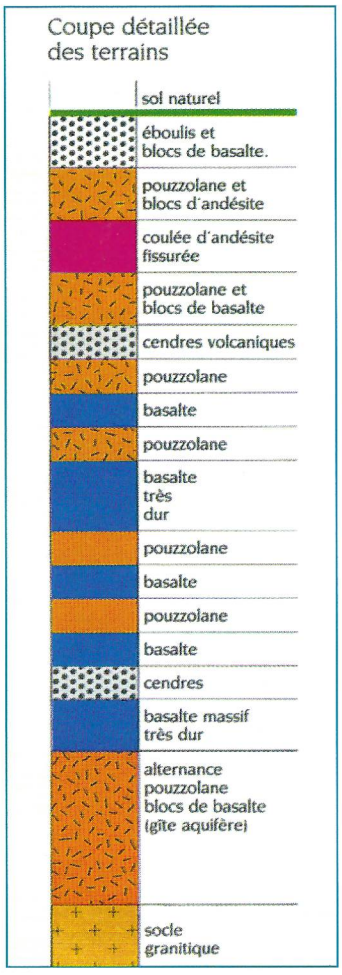
A vol d'oiseau, 12 kilomètres seulement séparent les flèches de la cathédrale de Clermont-Ferrand et le cratère du Puy de la Nugère. C'est au flanc de cet ancien volcan, haut de 1003 mètres, et dont les pentes boisées sont vierges de toute pollution d'origine agricole ou industrielle, qu'est captée l'eau minérale de Volvic.

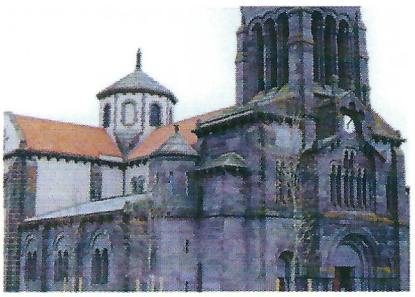
Le site volcanique et le bassin hydrogéologique de Volvic

La plupart des éruptions volcaniques de la chaîne des Dômes se sont produites pendant la dernière période glaciaire. En général, chaque volcan (mais il y a des exceptions) résulte d'une éruption unique à l'issue de laquelle l'orifice qui a permis l'évacuation de la lave est bouché. Une nouvelle éruption nécessitera la création d'un autre conduit. Les laves ne contiennent pas l'élément carbone, mais les plus récentes contiennent des débris de végétaux brûlés qui permettent une datation par le carbone 14. La dernière coulée du puy de la Nugère aurait environ 15000 ans. La lave qui en a résulté est une trachyandésite basaltique, pierre grise très dure, riche en silice (52%), qui a été exploitée dès le treizième siècle comme matériau de construction et qui, employée comme tel en Auvergne, donne une allure un peu austère à nombre de monuments et constructions.

Au cours des âges précédant la période éruptive, les réseaux hydrographiques avaient creusé une vallée d'ouest en est dans la roche granitique. Les éruptions ont entraîné la formation d'un lac de lave et de deux cônes de type strombolien. Les coulées ont tout naturellement emprunté le chemin de la vallée qu'elles ont comblée de matériaux volcaniques, basaltes, pouzzolanes, cendres et scories, sur une épaisseur allant jusqu'à plus de cent mètres. Ce

sont des roches jeunes qui n'ont pas été recouvertes de terres alluviales et qui sont particulièrement perméables.





Eglise de Volvic; la façade a été reconstruite en lave au 19ème siècle.

Les eaux de pluie s'y infiltrent en totalité, en effet il n'existe aucun cours d'eau en surface, jusqu'à atteindre le soubassement de granite, où elles retrouvent le tracé de l'ancienne vallée et forment des rivières souterraines. Cette lente percolation lui confère une grande pureté bactériologique et permet la dissolution de composés minéraux.

Durant les dernières décennies, les besoins en eau des localités voisines amenèrent à étudier la circulation souterraine, puis à creuser une galerie permettant l'exploitation.

Fontaine de la place

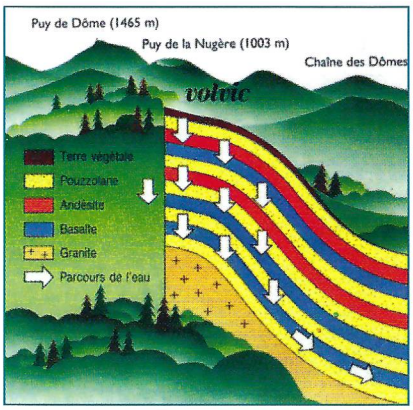
L'EAU MINERALE NATURELLE DE VOLVIC

Historique

C'est vers la fin du XIXème siècle qu'on a commencé à s'intéresser aux ressources hydrologiques du bassin de Volvic dans le but d'alimenter en eau, non seulement la ville de Volvic elle-même, mais également les villes voisines telles que Châtelguyon et Riom. Les études géologiques entreprises conduisirent à creuser une longue galerie de 700 mètres, qui permit une importante arrivée d'eau. Il s'agit de la source du Goulot, inaugurée en 1927, et qui contribue encore aujourd'hui à l'alimentation en eau de plusieurs communes de la région.
Après d'autres recherches, un forage de 80 mètres de profondeur aboutit à la découverte des sources Clairvic en 1963.

Caractères de l'eau minérale naturelle de Volvic

L'eau des sources Clairvic est caractérisée par une température remarquablement constante de 8°C, une faible minéralisation totale (109 mg/L), un pH neutre (très voisin de 7), et la présence d'oligo-éléments (cuivre, molybdène), dont certains sont peu courants, comme le vanadium (0,02 mg/L). De par la nature des roches traversées, elle est aussi riche en silice : 30 mg/L. Fn revanche elle est peu calcaire et sa teneur en nitrate est infime.
Les laboratoires de recherche l'utilisent préférentiellement pour les cultures cellulaires et l'élevage de petits animaux délicats.

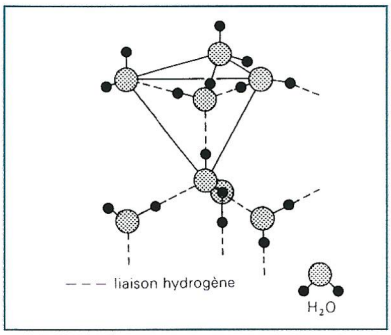


Coupe des terrains.

CATIONS	mg/L
Ion calcium	9,9
Ion magnésium	6,1
Ion sodium	9,4
Ion potassium	5,7
Ion fer II	< 0,005
ANIONS	**mg/L**
Ion chlorure	8,4
Ion nitrate	6,3
Ion nitrite	0
Ion sulfate	6,9
Ion hydrogénocarbonate	65,3

Une espèce chimique bien singulière

L'eau, si banale et si répandue, est une espèce chimique aux étranges propriétés, dont la plus lourde de conséquence est de se trouver sur terre à l'état liquide. Si on la compare aux autres corps composés d'éléments non-métalliques avec l'hydrogène (H_2S, NH_3), sa température d'ébullition à la pression atmosphérique ne devrait pas être 100°C mais -63°C! Quant à la température de congélation sous la pression atmosphérique, elle est pour nous un seuil d'importance, qui conditionne, entre autres, l'état de nos routes et nos récoltes de fruits. Il est aussi bien connu que la solidification de l'eau s'accompagne d'une augmentation de volume qui peut avoir des effets néfastes pour les canalisations. La densité de l'eau liquide n'est pas moins surprenante puisqu'elle présente un maximum à la température de 4°C. On comprend donc que, par temps froid, l'eau gèle en surface, tandis que les couches plus profondes peuvent rester à cette température de 4°C. A cette carte d'identité remarquable, ajoutons une chaleur massique très importante qui confère à l'eau un pouvoir régulateur sur le climat, et des propriétés de solvant vis à vis des composés ioniques.
Les propriétés de l'eau s'interprètent par sa structure. Les molécules d'eau H_20 sont coudées et présentent un moment dipolaire important parce que les barycentres des charges positives et négatives ne coincîdent pas. D'autre part les molécules se lient les unes aux autres par liaison hydrogène, c'est-à-dire une force électrique entre la partie négative d'un atome d'oxygène et la partie positive d'un atome d'hydrogène appartenant à une autre molécule. Il s'ensuit que dans la glace chaque molécule a tendance à se lier à quatre voisines donnant naissance à une structure relativement lacunaire. Lors de la fusion, quelques liaisons hydrogène se rompent, l'arrangement devient moins ordonné, et la structure plus compacte. En réalité la durée de vie d'une liaison hydrogène particulière est très brève : 10^{-12} seconde, mais à chaque instant la proportion de molécules liées est importante :



70% à 0°C. Cette situation autorise l'emploi d'une description statistique: chaque molécule peut être rangée dans l'une des cinq classes suivantes : molécules présentant 0, 1, 2, 3 ou 4 liaisons hydrogène. Les liaisons se formant de façon aléatoire, la population de chaque classe suit une loi de distribution binomiale.
D'autre part on admet l'hypothèse que le volume occupé par une molécule est d'autant plus grand que le nombre de liaisons est élevé. Ceci expliquerait les anomalies observées à la fusion de l'eau.
D'après CLEFS CEA n°19, hiver 1990.

Propriétés physiologiques

Faiblement minéralisée et pauvre en ion sodium, l'eau de Volvic est absolument sans contre-indication. Favorisant la diurèse, elle est recommandée dans le cas d'affections urinaires. Grâce à son action décongestionnante, elle peut être utilisée en dermatologie et pour les soins quotidiens de la peau. Sa teneur en oligo-éléments en font une eau intéressante sur le plan diététique. A la suite d'une étude clinique approfondie, l'eau de Volvic a été classée eau minérale naturelle par le Ministère de la Santé en 1965.

Environs du Puy de la Nugère

Eau minérale naturelle, eau de source, eau potable

Pour mériter ce titre d'eau minérale naturelle, une eau doit être pure au point de vue bactériologique, de composition constante, captée en source profonde, et mise en bouteille à proximité du captage sans avoir subi aucun traitement. Par rapport à une simple eau de source, elle doit en outre posséder des propriétés favorables à la santé. Son exploitation est soumise à autorisation et fait l'objet de contrôles.
Ces conditions la distinguent radicalement des eaux de robinet, dont l'origine peut être variée : sources, nappes phréatiques, cours d'eau, et qui, avant d'être envoyées dans les canalisations, subissent une succession de traitements physico-chimiques de façon à satisfaire aux normes de potabilité.

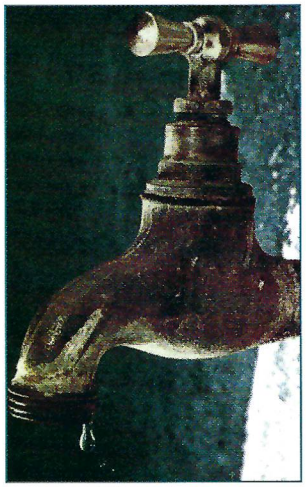
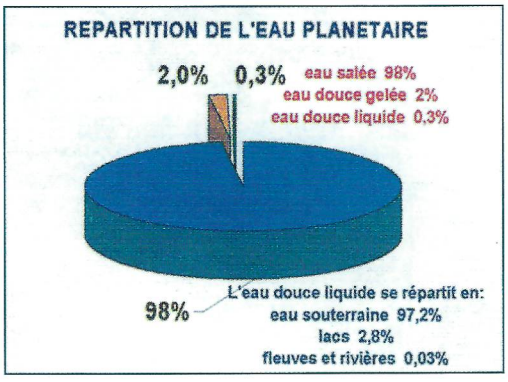


Photo : l'eau en Loire-Bretagne. N° 55.

Répartition de l'eau planétaire

La ressource totale en eau sur la terre est d'environ 1400 millions de km³. Cela paraît énorme, mais le diagramme représentant la répartition de l'eau a de quoi faire réfléchir. L'eau des fleuves et rivières, la plus utilisée par l'homme, est en proportion très faible, toutefois il s'agit de la quantité disponible à un instant donné et l'homme peut en réalité en tirer bien davantage au cours d'une année, puisque cette eau circule et se renouvelle.



Etapes du traitement de l'eau potable

1) Préoxydation, par l'ozone par exemple, pour éliminer certains produits.
2) Coagulation-floculation, pour agréger les particules en suspension.
3) Décantation. Les boues sont récupérées et traitées.
4) Filtration, sur couche de sable.
5) Oxydation, pour dégrader les matières organiques.
6) Filtration sur charbon actif, qui contribue à éliminer les micropolluants.
7) Reminéralisation, de façon à ajuster le pH et la dureté à des valeurs convenables.
8) Désinfection par le chlore pour éliminer les microorganismes.

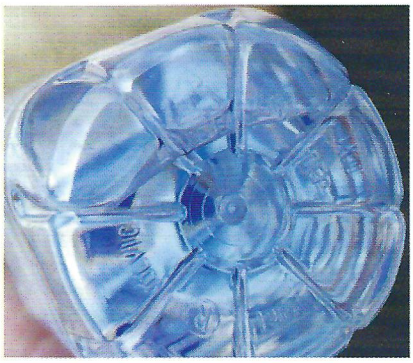
D'après "L'Eau en Loire-Bretagne" n°55, Juin 1995

L'EMBOUTEILLAGE À L'USINE DU CHANCET (VOLVIC)

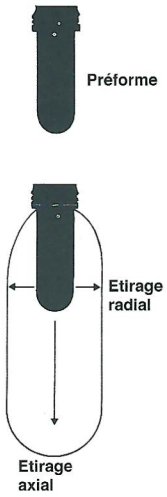
L'eau des sources Clairvic provient de quatre forages situés au voisinage de l'usine du Goulet mais celle-ci n'assure en fait que 5% de la production. L'eau des sources est acheminée par une canalisation en acier inoxydable, longue de 4 kilomètres, jusqu'à l'usine du Chancet, construite en 1975 et agrandie par la suite. La source a un débit total de 600 litres par seconde. Dans le but de respecter l'environnement, la société des eaux de Volvic ne peut en prélever que 90 litres au maximum. Actuellement elle prélève 40 litres d'eau par seconde. Du captage à la mise en bouteilles, il ne s'écoule pas plus de vingt minutes.

Dans l'usine du Chancet, on fabrique les différents types de bouteilles à partir du PET en granulés blancs et teintés bleus mélangés. La matière plastique, fondue au voisinage de 280°C, est injectée dans des moules, au moyen d'une vis sans fin, pour donner naissance aux préformes, qui sont ensuite refroidies rapidement. Les préformes se présentent sous l'aspect de petits tubes et comportent déjà le goulot à vis dans sa dimension définitive. Elles sont enfin transformées en bouteilles par soufflage d'air stérile. Le fond des bouteilles en PET se caractérise par un point de 3 à 5 mm de diamètre qui se forme au moulage. Ces bouteilles ne sont pas stockées mais remplies dans un délai de quelques minutes, et dans des conditions d'hygiène particulièrement strictes. Après étiquetage, les bouteilles sont empaquetées, groupées en palettes, et acheminées vers les quais de chargement. Tout au long de cette production, s'exercent des surveillances et contrôles divers : les laboratoires n'effectuent pas moins de 1000 analyses quotidiennes.

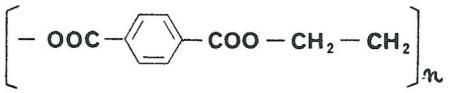
Volvic produit 750 millions de bouteilles par an. Sa réputation s'étend à une soixantaine de pays étrangers, en particulier au Japon, à l'Allemagne et à l'Angleterre.



Le fond de la bouteille avec un point central.



Le polyéthylène téréphtalate (PET)



Le PET, découvert en 1941, est un polymère appartenant à la famille des polyesters. On peut considérer la macromolécule comme résultant de la polycondensation de l'acide téréphtalique (acide benzène-1,4-dicarboxylique) et de l'éthylèneglycol (éthane-1,2-diol). En pratique, l'acide téréphtalique est remplacé par son ester diméthylique. Très utilisé dès l'origine sous forme de films et de fibres textiles, il est aussi, depuis 1975, employé à la fabrication de corps creux. Le PET est livré par les producteurs sous forme de granulés dans un état amorphe ou semi-cristallin. La substance est thermoplastique avec un point de fusion voisin de 250 °C et peut être travaillée par injection et extrusion-soufflage.

Le PET est beaucoup employé pour le conditionnement des boissons gazeuses ou non. Grâce à des techniques de plus en plus poussées (biétirage), les bouteilles sont de plus en plus minces: une bouteille de capacité 1,5L ne pèse que 42 à 44 g. Les bouteilles vides sont aisément compactables et recyclables: par rapport à la production de PET neuf, le traitement du PET usagé permet une économie d'énergie de 60%.

Bibliographie

Documents Eau minérale de Volvic

Charles PEDOYA, La guerre de l'eau, éditions Frison-Roche, 1990.

Sylvie DURIN, L 'eau minérale de Volvic, Thèse 1986.

Alain DE GOER DE HERVE, Volcans d'Auvergne la menace d'une éruption, éditions Ouest-France.

La DEPECHE SCIENTIFIQUE DU PARC DES VOLCANS, Volcanisme et volcans d'Auvergne, mars 1995.

L'EAU EN LOIRE-BRETAGNE, revue de l'agence de l'eau de Loire-Bretagne, Juin 1995.

A VOLVIC, AUTOUR DES SOURCES

* Promenades et randonnées
* Exposition et projection de films
* Visite de l'usine d'embouteillage

Espace d'information Volvic
04 73 64 51 24

Merci pour leur aide précieuse à Aline CARLIER et Anne-Marie DELHERM de la Société des eaux de Volvic, ainsi qu'à Thierry BISSIRIEIX de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne.

ELEMENTS TRACES ET EAU MINERALE OLIGO-ELEMENTS ET THERMALISME

Denise PEPIN

Professeur à la Faculté de Pharmacie de Clermont-Ferrand
Directeur de l'Institut Louise Blanquet

Le choix volontaire de ce double titre est destiné à montrer combien il est difficile de trouver une terminologie universelle pour les composants des eaux dont la dénomination et la signification varient selon la discipline concernée.

ELEMENTS TRACES, HYDROGEOCHIMIE ET GEOCHIMIE, OLIGO-ELEMENTS ET BIOLOGIE

C'est aux chimistes du début du siècle que l'on doit la découverte des éléments traces dans les eaux minérales (tableau n° 1). Se référant aux difficultés de détection et de dosage qui nécessitaient la mise en oeuvre de méthodes spéciales d'analyse, les chimistes de l'époque qualifiaient les éléments traces de «spectrographiques», évoquant ainsi la seule méthode qui permettait de les détecter avant de les dénommer «traces», car si la détection en était possible, la quantification en restait fort délicate.

Pour le géochimiste, ce sont des éléments qui n'appartiennent pas aux huit éléments les plus abondants de la lithosphère (tableau n° 2). Ces huit éléments sont définis comme ayant dans l'écorce terrestre une teneur supérieure à 1% ; bien que représentant une minorité par rapport aux 92 éléments existants, ils constituent 84% de l'écorce terrestre. Parmi les 84 éléments restants, 25 ont une teneur comprise entre 0,001 % et 1%, les 59 autres une teneur inférieure à 0,001%.

Certains de ces éléments, dénommés biophiles, se retrouvent dans l'organisme humain avec une répartition différente de celle de la lithosphère (tableau n° 3). Les 11 éléments répertoriés au tableau n° 3 représentent 99,9 % du poids du corps, la fraction restante est constituée par les éléments traces ; le biologiste considère donc que la concentration de l'élément trace est inférieure à 0,05 % alors que le géochimiste fixe la limite à 1 %.

Il est remarquable de constater que la présence de ces éléments biophiles a été mise en évidence, chez les organismes vivants, parallèlement à la découverte des éléments traces dans les eaux minérales (tableau n° 4).

Après la mise en évidence de la présence de ces éléments, c'est leur rôle biologique qui a été reconnu malgré leur faible concentration. Le problème des éléments traces ou oligo-éléments revêt donc deux types d'aspects, l'un analytique, l'autre biologique.

LES ASPECTS ANALYTIQUES

Aux éléments traces, le chimiste oppose des éléments dominants qu'il englobe sous le terme général de matrice. L'importance aussi bien que la nature de la matrice interviennent sur le plan analytique par la dilution ou les interférences qu'elles engendrent.

Dans le cas des roches, la matrice est représentée par des éléments minéraux ; dans les échantillons biologiques, par de l'eau et des composés organiques ; et dans les eaux minérales essentiellement par de l'eau et des éléments minéraux. La fraction aqueuse de la matrice des eaux minérales représente 99 à 99,5 %, la fraction minérale 0,5 à 1%. L'analyse des traces requiert, donc, la mise en oeuvre de méthodes instrumentales performantes desquelles on exige un certain nombre de qualités dont les plus importantes sont la sensibilité et la spécificité. La spécificité suppose que la méthode peu sujette aux interférences donne des résultats fiables, donc spécifiques de l'élément dosé.

La sensibilité est la principale qualité requise pour l'analyse des éléments traces, elle permet de comparer entre elles les méthodes d'analyse et de les sélectionner.

Limitées dans leur sensibilité les méthodes chimiques sont depuis longtemps supplantées dans l'analyse des traces par les méthodes physiques instrumentales.
Les méthodes spectrales et les méthodes nucléaires sont celles qui répondent à la fois aux impératifs de sensibilité et de spécificité. Parmi les méthodes spectrales d'émission, la spectrographie d'arc est longtemps restée l'unique méthode avant d'être relayée par la torche à plasma qui en est la version moderne. La torche à plasma d'argon couvre un domaine de sensibilité qui peut, selon l'élément, atteindre au mieux 1 millième de microgramme/litre (10^{-9} g/l). La torche à plasma, couplée à la spectrométrie de masse présente une sensibilité plus grande encore puisqu'elle descend jusqu'à 10^{-10} voire 10^{-12} grammes/litre.
L'absorption atomique, et notamment l'absorption atomique sans flamme au four de graphite est actuellement incontestablement la méthode de choix car elle est dotée d'une sensibilité qui permet la détection de quelques microgrammes, en mettant en oeuvre des volumes d'échantillon de quelques microlitres (millionième de litre).
Les méthodes nucléaires, et tout particulièrement l'activation neutronique constituent un instrument puissant ; peu sujettes aux interférences, elles sont considérées comme des méthodes de référence. Malheureusement, le coût, l'importance des installations et la technicité nécessaires à leur mise en oeuvre posent une sévère restriction à leur généralisation.

LES ASPECTS BIOLOGIQUES

Dès 1854, lorsqu'il découvrit l'arsenic dans les eaux de La Bourboule THENARD (3) soupçonnait déjà l'importance de la découverte des traces dans les eaux minérales et exprimait ainsi ses soupçons «si l'on considère qu'il peut exister dans les eaux plusieurs autres substances que l'on ne soupçonnait pas autrefois, que quelques unes d'entre elles soient très actives et qu'il serait possible que l'on en y découvrit, on en tirera cette conséquence qu'il faut refaire l'analyse du moins des principales eaux minérales dans l'intérêt de la science médicale». Il pressentait alors la possibilité de voir un jour reconnaitre à la fois la présence d'éléments traces dans les eaux minérales et le rôle biologique de ces traces.
C'est à G. BERTRAND que revint le mérite de reconnaitre aux éléments traces, dans les années 1920, ce rôle biologique ; il les dénomma alors «oligo-éléments». On peut donc retenir que les oligo-éléments partagent avec les éléments traces la particularité de leur faible concentration mais s'en démarquent par leur rôle biologique.
Les oligo-éléments exercent chez les êtres vivants toute une série de fonctions organiques. Ils font partie de systèmes enzymatiques ou interviennent comme cofacteurs d'enzymes ; la plupart d'entre eux sont des métaux de transition dont la structure électronique particulière favorise la liaison avec des protéines. Dans certains cas, ce sont des constituants de molécules biologiques actives telles que les vitamines et les hormones.
Susceptibles de prendre part aux réactions de défense de l'organisme, ils peuvent également jouer un rôle structural.
Les oligo-éléments interviennent donc au niveau de fonctions multiples et variées ; leur excès tout comme leur insuffisance peut avoir de graves conséquences.

Depuis 1973, l'OMS (4) a reconnu en tant qu'oligo-éléments les 14 éléments suivants fer, iode, zinc, cuivre, sélénium, molybdène, chrome, manganèse, cobalt, fluor, nickel, étain, silice, vanadium.
COTZIAS (5) définit comme oligo-éléments essentiels ceux qui répondent à tous les critères suivants :

- être présents dans les tissus de tous les organismes vivants avec de faibles variations d'un individu à l'autre

- provoquer par leur carence des anomalies structurales et fonctionnelles analogues dans de nombreuses espèces

- faire disparaitre les anomalies des troubles de carence par l'apport du seul élément.

Les récentes observations de cliniciens confrontés aux problèmes de l'alimentation artificielle au long cours par voie entérale ou parentérale, viennent confirmer l'essentialité de

ces éléments chez l'homme (6) (7).
La définition de l'essentialité suppose la mise en évidence des carences, or les possibilités de carence chez l'homme et l'animal sont très différentes, la démonstration expérimentale du rôle d'un élément chez l'animal ne saurait donc constituer une preuve suffisante d'essentialité chez l'homme. La démonstration du caractère essentiel d'un nutriment chez l'homme repose sur la mise en évidence d'un risque de déficit établi à partir d'études épidémiologiques.

FAVIER (8) se fondant sur la comparaison des apports usuels et des besoins chez l'homme distingue 4 classes d' éléments traces (tableau n° 5).

- les oligo-éléments réellement essentiels : iode, fer, cuivre, zinc, sélénium, chrome, molybdène, (fluor).
- les oligo-éléments essentiels à faible risque de carence : manganèse, silicium, vanadium, nickel, étain, cobalt.
- les éléments ultra traces expérimentalement essentiels (risques de carence sans doute nuls chez l'homme): bore, brome, arsenic, plomb, cadmium, lithium.
- les éléments ultra traces pour lesquels existent potentiellement quelques preuves embryonnaires d'essentialité : scandium, tellure, béryllium, lanthane et niobium.

LES OLIGO-ELEMENTS DES EAUX MINERALES

Les recoupements que l'on peut effectuer d'une part avec la classification de FAVIER et d'autre part avec la liste des éléments traces dont la présence a été reconnue dans les eaux minérales par des méthodes modernes et fiables permettent d'attribuer avec certitude aux eaux minérales 10 oligo-éléments parmi ceux qui ont été reconnus en tant que tels par un comité d'experts OMS en 1973. (4) (tableau n° 5).

LE CUIVRE

L'organisme d'un adulte renferme 100 à 150 mg de cuivre inégalement répartis, les plus fortes concentrations tissulaires se retrouvent au niveau du foie, des reins et du cerveau. Le cuivre sanguin est, pour sa plus grande part, lié à la céruléoplasmine protéine qui renferme 8 atomes de cuivre, 4 cuivreux et 4 cuivriques. Le cuivre est essentiellement cofacteur de systèmes enzymatiques tels que la tyrosinase, les cytochromes oxydases, la monoamineoxydase, la superoxyde dismutase. La plupart de ces enzymes associent, du reste, le cuivre et le zinc.
Le zinc interfère dans le métabolisme du cuivre en raison de la compétition entre deux ions de structure électronique et de valence identique. Par la céruléoplasmine, il intervient dans le métabolisme du fer, c'est ainsi qu'il peut être impliqué dans certaines anémies.
Le cuivre est un métal très répandu dans la nature ; on le trouve dans tous les aliments mais à des concentrations variables, les produits carnés en renferment 2 à 4 ppm*, les crustacés et les coquillages notamment les huîtres, en sont particulièrement riches, 200 à 400 ppm dans le produit sec. Les concentrations dans les végétaux, plus modestes, représentent 10 à 15 ppm dans la matière sèche; le lait et les produits laitiers en sont particulièrement pauvres. Dans les eaux de boisson, la limite maximale en a été fixée à 0,05 ppm à la source mais sa concentration dans l'eau de distribution publique peut atteindre 1 ppm et plus lorsque l'eau est distribuée par des canalisations en cuivre.
Les concentrations rencontrées dans les eaux minérales sont de l'ordre du microgramme/litre, elles peuvent atteindre jusqu'à 100 microgrammes/litre.

LE FLUOR

C'est un élément ubiquitaire que l'on trouve à des concentrations très variables dans les roches, les sols, l'eau, les plantes et les animaux. Chez l'homme, le fluor représente 0,0037% du poids du corps. Il est inégalement réparti dans l'organisme, en effet, 98% du fluor total de l'organisme sont concentrés dans les tissus durs. La concentration en fluor de l'os croît avec l'âge.

Le fluor, plus connu pour ses effets toxiques dans la fluorose osseuse et la fluorose dentaire, intoxication dues habituellement à la consommation d'eaux riches en fluor, est reconnu depuis peu comme élément essentiel, son essentialité reste encore cependant controversée. Il est, en effet, difficile de mettre en évidence des symptômes nets de carence, toutefois, on lui reconnait un rôle certain dans la prévention des caries dentaires.
L'apport alimentaire en fluor est, en majeure partie, représenté par la consommation

**ppm : partie par million soit mg/kg.*

d'eau dans laquelle il se trouve sous forme de fluorures. La concentration en fluorures des eaux est directement influencée par leur origine géologique, d'une façon générale ce sont les eaux riches en silice ou en sodium qui le renferme en concentrations relativement plus élevées. Les eaux minérales bicarbonatées sodiques sont les plus riches, dans ce type d'eau la concentration en fluor peut atteindre des valeurs de l'ordre de la dizaine de mg/l.

LE FER

Le fer est l'un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre après l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Le corps humain en renferme 0,006 %. L'importance du fer pour la santé a été reconnue au 18ème siècle grâce aux travaux de LEMERY et GEOFFROY.
Le fer intervient dans la constitution de pigments respiratoires assurant d'une part, les échanges de l'oxygène entre l'organisme et le milieu extérieur grâce à l'hémoglobine et d'autre part, le stockage de l'oxygène dans les tissus avec la myoglobine ; on le trouve également au niveau de différentes enzymes héminiques telles que les cytochromes, ou non héminiques telles que des déshydrogénases ou des oxydases.
Le besoin en fer pour l'homme est variable selon les différentes catégories de population. Plus important chez la femme que chez l'homme, il est notablement augmenté chez la femme enceinte ainsi que chez le nourrisson et l'enfant.
La principale source de fer est alimentaire ; elle est constituée par les viandes qui en renferment jusqu'à 5 à 6 mg pour 100 grammes.
Dans les eaux minérales, la concentration en fer peut atteindre des valeurs de l'ordre de 10 mg/l ; ce fer, maintenu en solution à l'état ferreux, précipite lorsqu'il passe à l'état ferrique à la faveur de l'oxygénation de l'eau après son émergence. Le précipité ferrique, ainsi formé, entraine par adsorption bon nombre des éléments traces présents dans les eaux. Pour bénéficier de la présence du fer d'une eau minérale, ainsi que des autres oligo-éléments, il est important soit d'utiliser les eaux au lieu même de leur émergence , soit d'en assurer le transport à l'abri de l'air.

L'IODE

La teneur en iode de la croûte terrestre est de 0,01 ppm, les eaux océaniques le renferment sous forme d'iodure et en constituent la réserve la plus importante. Chez l'homme, l'iode se concentre dans le tissu thyroïdien où il représente 70 à 90% de l'iode total du corps humain.
L'iode est indispensable à la synthèse des hormones thyroïdiennes, ces hormones régulent un grand nombre de fonctions chez l'homme ; elles interviennent au niveau de la croissance, ainsi que dans le métabolisme des protides , des lipides et des glucides.
La carence en iode est à l'origine du goitre hypothyroïdien qui s'accompagne de crétinisme et de retard mental.
Les aliments d'origine marine sont ceux qui présentent la plus forte concentration en iode.
La teneur en iode des eaux continentales est généralement faible, elle est de l'ordre du microgramme par litre.
Ce sont les eaux minérales chlorurées sodiques qui sont les plus riches en iode ; celles-ci en renferment des concentrations pouvant atteindre 1 mg/l.

LE MANGANESE

Le manganèse se trouve souvent associé au fer dans la nature.
Sa teneur ne dépasse pas 0,2 mg dans l'organisme où sa répartition est très inégale ; on le trouve, en effet, à des concentrations plus importantes dans les tissus riches en mitochondries tels que le foie et les reins.
Le manganèse a été le premier oligo-élément reconnu par G. BERTRAND lors de ses expériences sur une enzyme, la laccase. Bien que de nombreux complexes métalloenzymes (phosphatase alcaline, aminopeptidase, cholinestérase, carboxylase) puissent être activés par le manganèse, le manganèse n'a pas, pour autant, été l'objet de travaux aussi nombreux que les autres métaux ; aujourd'hui, la découverte de son rôle dans les superoxydes dismutases lui donne un regain d'intérêt en biologie.
Le manganèse se trouve en concentration plus importante dans les aliments d'origine végétale ; ce sont les céréales non raffinées qui en sont les plus riches ; le thé présente également une richesse exceptionnelle en manganèse. La concentration du manganèse dans les eaux de distribution publique est limitée à 0,05 mg/l par les normes de la plupart des pays en raison de la coloration marron qui apparait lors de son oxydation, et qui entraine une

gêne considérable dans l'utilisation domestique.
Dans les eaux minérales, notamment dans les eaux minérales ferrugineuses du Massif Central, on relève des concentrations relativement élevées généralement supérieures au 1/10ème de mg/l et pouvant aller jusqu'à plusieurs mg/l.

LE MOLYBDENE

L'attention portée au rôle biologique du molybdène date d'une trentaine d'années. Cet élément a été reconnu comme un élément constitutif de métalloenzymes flaviniques : xanthine oxydase, xanthine déshydrogénase et sulfite oxydase.
Le molybdène est présent dans les végétaux à des concentrations variables allant de moins de 5 jusqu'à 70 ppm dans les cendres ; les légumineuses sont particulièrement riches en molybdène. Les productions animales, à l'exception du foie (2 à 3 ppm) en renferment peu ; le lait n'en contient que 30 à 50 microgrammes par litre. Sa présence en quantité dosable dans les eaux est exceptionnelle, sa concentration est alors de quelques microgrammes par litre.
Le molybdène constitue cependant une particularité peu connue de certaines eaux minérales dans lesquelles il est présent à des concentrations pouvant atteindre jusqu'à 0,3 mg/l. (La Bourboule)

LE SELENIUM

Découvert en 1817 par BERZELIUS, le sélénium a des propriétés chimiques proches de celles du soufre ; au même titre que le soufre il peut, en effet, se rencontrer sous forme organique.
La teneur totale en sélénium du corps humain est inférieure au mg. Son rôle, d'abord reconnu chez l'animal, n'a été établi chez l'homme que vers les années 1980, en observant la réversibilité des troubles de carence par administration de sélénium d'une part chez les patients maintenus en alimentation artificielle au long cours et d'autre part dans la cardiomyopathie endémique de KESHAN. Le sélénium doit son rôle biologique principal à sa présence dans la glutathion péroxydase sous forme de sélénocystéine. C'est à ce titre qu'il intervient dans de nombreuses fonctions biologiques notamment dans la neutralisation des radicaux libres. Par ailleurs, il interagit avec des éléments tels que l'arsenic, le cadmium et le mercure dont il diminue la toxicité.
Compte-tenu de la grande variabilité géographique de la teneur des sols en sélénium, les éléments d'origine végétale présentent des teneurs très différentes selon les régions. Les aliments protéinés en constituent la source la meilleure et la plus importante.
La teneur en sélénium des eaux est variable le plus souvent inférieure au microgramme/litre, elle peut atteindre dans certaines eaux minérales une valeur de 50 microgrammes/litre. (La Roche Posay).

LE SILICIUM

Le silicium constitue pratiquement 28% de la croûte terrestre où on le trouve essentiellement sous forme d'aluminosilicate.
Le silicium a été signalé dès 1848 dans les cendres de tissus animaux ; en 1911 son rôle antiathéromateux a été évoqué; en 1972, il a été reconnu comme élément essentiel chez le rat et le poulet .
Il est inégalement réparti dans le corps humain où on le trouve en plus grande quantité au niveau des os, des cartilages et du tissu collagène. Le silicium joue un rôle dans l'élaboration du squelette, il joue, en outre, un rôle dans la synthèse et dans la structure des matrices organiques du tissu conjonctif.
Le besoin alimentaire en silicium de l'homme est encore mal défini, on le trouve essentiellement dans les aliments végétaux et dans les os.
Dans les eaux minérales il atteint des concentrations relativement élevées pouvant atteindre plusieurs centaines de mg/litre exprimé en SiO_2.

LE VANADIUM

Les concentrations tissulaires du vanadium chez l'homme sont variables selon les tissus, on en trouve plusieurs microgrammes/gramme dans le foie, les reins, mais moins de 1 microgramme dans le tissu musculaire.
Les effets du vanadium sont reconnus lorsqu'il est administré à des concentrations incomparablement plus importantes que celles que l'on trouve dans les apports alimentaires ; la question de son essentialité est donc controversée car son action peut, dans ces cas là, être plus pharmacologique que physiologique.
On trouve le vanadium en quantités faibles, dans les aliments de l'homme. Les besoins quotidiens n'ont pu être déterminés, car les états de carence

ne sont pas clairement définis. Le vanadium est absent de la plupart des ressources en eau ; mais on le trouve à des concentrations notables, de l'ordre d'une dizaine de microgrammes/litre, dans certaines eaux minérales. (Volvic)

LE ZINC

Parmi les oligo-éléments que l'on rencontre chez l'homme, le zinc occupe la 2ème place après le fer ; la quantité totale de zinc est, en effet, de 2 grammes pour un homme adulte. Les plus fortes concentrations en zinc se trouvent dans la prostate, le foie, les reins, les muscles, la rétine et les phanères. Il est stocké sous forme de complexe avec la métallothionéine. Le zinc plasmatique est normalement voisin de 1 mg/l ; sa concentration globulaire est environ 10 fois plus importante.

Le rôle biologique du zinc a été reconnu depuis plus d'un siècle ; l'importance du nombre de travaux récents souligne tout l'intérêt qui s'attache encore à cet élément depuis la découverte de son rôle biologique. Plus de 80 enzymes renferment du zinc et associent quelquefois même le zinc et le cuivre. Le zinc intervient, en outre, dans le métabolisme et les fonctions des acides nucléiques. sa déficience entraîne, par ailleurs, une diminution des défenses immunitaires consécutive à l'atteinte de la synthèse des protéines ainsi qu'une diminution de la production d'hormones protéiques tels que l'insuline et l'hormone somatrope.

Les besoins alimentaires quotidiens en zinc sont de 15 mg/jour. Les aliments riches en protéines sont d'une façon générale plus riches en zinc. Les aliments d'origine végétale contribuent, en revanche, à un apport plus modeste. La concentration en zinc des eaux douces avoisine 10 microgrammes/litre, mais elle peut être considérablement augmentée par le contact avec des canalisations en fer galvanisé : les normes CEE en fixent la limite à 5 mg/l pour les eaux de robinet.

CONCLUSIONS

Si dans l'étude des éléments traces, les buts poursuivis par les hydrogéologues, les biologistes et les médecins sont différents, il semble logique de concevoir à terme une convergence de vue entre ces différentes disciplines ; l'hydrogéologue étant en mesure d'offrir aux biologistes et aux médecins, une eau minérale de composition oligométallique attendue, par la connaissance qu'il aura acquise de la circulation des eaux grâce à l'étude des éléments traces.

D. Pépin

BIBLIOGRAPHIE

1 . PEPIN. D (1970)
Application de la spectrographie d'émission à l'étude des éléments traces des eaux minérales.
Thèse de Doctorat d'Etat en Pharmacie - Université de Clermont-Ferrand.

2. NEUZIL. E (1987)
Histoire naturelle des oligo-éléments.
L'alimentation et la vie, 71, n° 1, 4-9.

3 . THENARD. L.J. (1854)
C..R. Acad. Sci, 39, 763

4 . OMS (1973)
Les oligo-éléments en nutrition humaine
Rapport technique n° 532

5 . COTZIAS. G.C. (1967)
Proc 1st Hun. Conf. Trace Substances Environn. Health

6 . ZAZZO. V.F. (1985)
Pourquoi des oligo-éléments ?
L'alimentation parentérale Ed. ARNETTE

7. VAN RIJ. A.N., MC KENZIE. J.M., THOMSON. C.D., ROBINSON. M.F. (1981)
Am. J. Clin. Nutr., 32, 2076-2085

8. FAVIER. A. (1991)
Les oligo-éléments en nutrition humaine.
Les oligo-éléments en médecine et en biologie
SFRETE, Ed Lavoisier 41-75

Tableau n° 1

CHRONOLOGIE DE LA DECOUVERTE DES «ELEMENTS SPECTROGRAPHIQUES DES EAUX MINERALES»

1847 FEHLING	Cu à Salz ou Necker
1851 MISSCHERLICH	As à Frienwalde
1851 THENARD	As à La Bourboule
1852 FRESENIUS	Ba, Sr, B à Bad Tolz
1860-1861 KIRCHHOFF-BUNSEN	découverte de deux corps simples nouveaux le Cs et le Rb dans les eaux minérales
1914 BARDET	inventaire exhaustif des éléments traces des eaux françaises Pb, Sn, Ag, Ge, Ga, Mo, Cu, Bi, Zn, Be, Sb, Co, Cu, Ni, Au, Th, Ti, W et V.

Tableau n° 2

LES ELEMENTS DE LA LITHOSPHERE

OXYGENE	47 %
SILICIUM	28%
ALUMINIUM	8%
FER	4,5 %
CALCIUM	3,5 %
SODIUM	2,5 %
POTASSIUM	2,5 %
MAGNESIUM	2 %

Tableau n° 3

LES PRINCIPAUX ELEMENTS MINERAUX DE L'ORGANISME HUMAIN

OXYGENE	65 %
CARBONE	18%
HYDROGENE	10%
AZOTE	3 %
CALCIUM	1,5 %
PHOSPHORE	1 %
POTASSIUM	0,035 %
SOUFRE	0,25 %
SODIUM	0,15 %
CHLORE	0,15 %
MAGNESIUM	0,05 %

Tableau n° 4

HISTORIQUE DE LA DECOUVERTE DES ELEMENTS TRACES ET DE LEUR ROLE EN BIOLOGIE (2)

1745 GEOFFROY	Fe dans le sang
1800 MORICHINIF	F dans l'émail dentaire
1800 VAUQUELIN	Mn dans les os
1850 CHATIN	Iode et goitre
1869 RAULIN	Zn et moisissures
1878 FREDERICQ	Cu et hémocyanine
1897 BERTRAND G.	Mn et oxydation
1920-1930 BERTRAND G.	Mn, Co, Zn, Ni

Tableau n° 5

ELEMENTS TRACES ET OLIGOELEMENTS
Les éléments soulignés constituent les 14 oligo-éléments reconnus par l'OMS depuis 1973

Aspect hydrologique / Aspect biologique	Présence reconnue dans les eaux minérales	Présence citée à confirmer	Présence à démontrer
Oligo-éléments reconnus essentiels à risque de carence	**Fe, Cu, Zn, Se, Mo, F I**	**Cr**	
Oligo-éléments essentiels à faible risque de carence	**Mn, Si, V**	**Sn Ni, Co**	
Eléments ultra traces expérimentalement essentiels	B, Br, As Pb, Li		Cd
Eléments ultra traces potentiellement essentiels	Be		Sc, Te La, Nb

DOUZE EXPOSITIONS ITINÉRANTES DISPONIBLES

(s'adresser à l'ADASTA pour location)

I - DECOUVERTE DE L'UNIVERS
Deux expositions d'Astronomie
1ère exposition :
DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS
(Astronomie et astrophysique)
Création ADASTA - AAAA
50 panneaux plastifiés (100x70 cm)
Les instruments d'observation.Où sommes-nous ?
Le système solaire, la lune, les éclipses.
Les galaxies.
Naissance et mort des étoiles.
Expériences d'astrophysique.

2ème exposition : COMETE DE HALLEY - 60 x 82 cm
1 / Halley 1986.
2 / Comment c'est fait ?
3 / Comète Bennett.
4 / La peur des comètes.
5 / 5 Comètes à la une.
6 / Halley de retour.
7 / On l'a déjà vue.
8 / Mais d'où viennent-elles ?
9 / Où vont-elles ?
10 / Rendez-vous à l'heure de Halley.
11 / Allons voir de plus près.
12 / Pour découvrir l'Univers.
13 / La Mission Véga.
14 / Le survol de la Comète.
15 / La Mission Giotto.
16 / La vision Giotto.
17 / Mobilisation internationale.
18 / Pourquoi Halley ?

II - En prenant le métro :
LE TICKET D'ARCHIMEDE
Création : Centre de vulgarisation de la connaissance
20 panneaux plastifiés (100x70 cm)
La couleur
1 / Pourquoi le ciel est bleu ?
2 / Où sont les tulipes bleues ?
3 / Le secret du caméléon.
4 / Pourquoi les chaussettes sont-elles rouges ?
5 / Un trou noir : c'est tout noir.
L'Eau
6 / la ronde de l'eau.
7 / Pourquoi la mer est-elle salée ?
8 / Maman, les petits bateaux.
9 / La recette du brouillard.
10 / La bouteille qui éclate au froid.
Bestiaire
11 / Pourquoi les chats voient-ils la nuit ?
12 / Qu'est-ce qui fait danser les abeilles ?
13 / Papillons amoureux.
14 / Qui peut plus que la puce.
15 / L'hippocampe : un papa pas comme les autres.
16 / Coup de foudre.
La météo
17 / Dessine-moi une goutte de pluie.
18 / Quel temps pour après-demain ?
19 / Les stars de la météo.
20 / la tornade ne manque pas d'air.

III- LA FIGURE DE LA TERRE

Palais de la Découverte et Ville de Caen 1987

24 panneaux plastifiés (80x120 cm)

1 / Présentation.
2 - 3 - 4 - 5 / Conflit d'idées entre Cartésiens et Newtoniens.
6 - 7 / Mesurer la Terre pour en connaître la forme.
8 / Itinéraires du voyage en Laponie.
9 / Ces messieurs du Nord : Maupertuis, Celsius, Clairaut.
10 / Les Lapons.
11 / Trois étapes du voyage.
12 / La triangulation sur le terrain.
13 - 14 / Principe de la triangulation.
15 - 16 / Détermination du méridien.
17 / Mesure de l'amplitude de l'arc.
18 / Calcul du degré du méridien.
19 / Vues d'aujourd'hui.
20 / L'expédition du Pérou.
21 / Bilan des opérations.
22 / La Terre aujourd'hui.
23 / Le Soleil de minuit.
24 / La géodésie spatiale.

IV - DEUX EXPOSITIONS SUR L'ESPACE

Création Palais de la Découverte / CNES

1ère exposition
18 panneaux plastifiés (100x70 cm)

1 / L'espace à quoi ça sert ?
Planète Terre
2 / L'environnement.
3 / La Vie de la Planète.
4 / Observer pour gérer.
Télécommunications
5 / 30 ans de Révolution.
6 / L'apport du satellite.
7 / La localisation.
8 / Vers de nouvelles révolutions.
Sciences
9 / Voyager dans l'espace.
10 / Pesanteur zéro.
11 / Les paradis observatoires.
Perspectives
12 / La Lune plateforme astronomique.
13 / Mars : la Planète sœur.
14 / Le voyage vers Mars.
15 / Les trajectoires vers Mars.
16 / Imaginons encore.
Moyens et finalités
17 / Le transport spatial.
18 / Un nouvel humanisme.

2ème exposition :
17 panneaux plastifiés (100x70 cm)

1 / En route pour l'Espace.
2 / Des outils pour l'Espace.
3 / De Diamant (1965) à la Famille Ariane.
4 / Pour l'Espace des technologies de pointe.
5 / Centre spatial de Kourou (Guyane).
6 / Une stratégie pour l'Espace.
7 / Un espace utile.
8 / L'observation de la Terre.
9 / L'espace au service des hommes.
10 / Un Espace pour la science.
11 / Exploration du système solaire.
12 / L'homme dans l'Espace.
13 / Un espace pour demain.
14 / Ariane 5 : mode d'emploi.
15 / L'avion spatial Hermès.
16 / Ariane lançant Hermès.
17 / Et le Futur...

V - LE MONDE VIVANT

Deux expositions de biologie médicale
Création Palais de la Découverte - INSERM

1ère exposition :
VOYAGE AU CENTRE DES ARTERES
24 panneaux plastifiés (100 X 70 cm)

1 / Voyage au centre des artères.
2 / Une mer intérieure.
3 / Les habitants de la Mer Intérieure.
4 / Bon sang - mauvais sang.
5 / Naissances dans un os à moelle.
6 / Les canaux de la mer intérieure.
7 / Flux sans reflux au coeur de la mer intérieure.
8 / Le souffle régénérateur.
9 / La face cachée du foie.
10 / Deux écologistes en mer intérieure;
11 / Alerte rouge, ne pas fuir.
12 / Défense d'entrer.
13 / Des défenses parfois défaillantes.
14 / Rouges ou blancs ... globules malades.
15 / Les conséquences parasites d'un repas de sang.
16 / Un faux sang;
17 / Passeport pour un transfusé.
18 / Mortels dommages.
19 / Danger Haute tension.
20 / Qui voit ses veines et ses artères, voit ses peines.
21/ Des mains qui n'ont pas dit leur dernier mot.
22 / L'union du vif et de l'artificiel.
23 / La mer intérieure en péril.
24 / La Recherche a le sang vif et le coeur à l'ouvrage.

Deuxième exposition :
DES VIRUS ET DES HOMMES (100x68 cm)
Des virus et des hommes

1 / Etranges poisons de tout le monde vivant.
2 / Comment est fait un virus.
3 / Quand les virus se multiplient dans les cellules.
4 / Les deux stratégies génétiques des virus.
5 / Les virus envahisseurs du corps humain.
6 / Virus intestinal cause de paralysie.
7 / Ces infections sournoises des herpès virus.
8 / De l'hépatite B au cancer du foie.
9 / Durée des maladies virales une grande diversité.
10 / Des canards et des hommes ; l'empire boréal de la grippe.
11 / Poliomyélite.
12 / Les relais de la rage.
13 / Un virus, un moustique, une fièvre tropicale.
14 / Un milliard de foies dans le monde : l'hépatite B.
15 / VIH et Sida.
16 / Sur la variole, le triomphe d'une vaccination.
17 / Lutte contre les virus : stratégies chimiques.
18 / Renforcer les défenses naturelles antivirales.
19 / Contre les virus, la meilleure des préventions, le vaccin.
20 / La vaccination antivirale.

VI - HISTOIRE DES SCIENCES

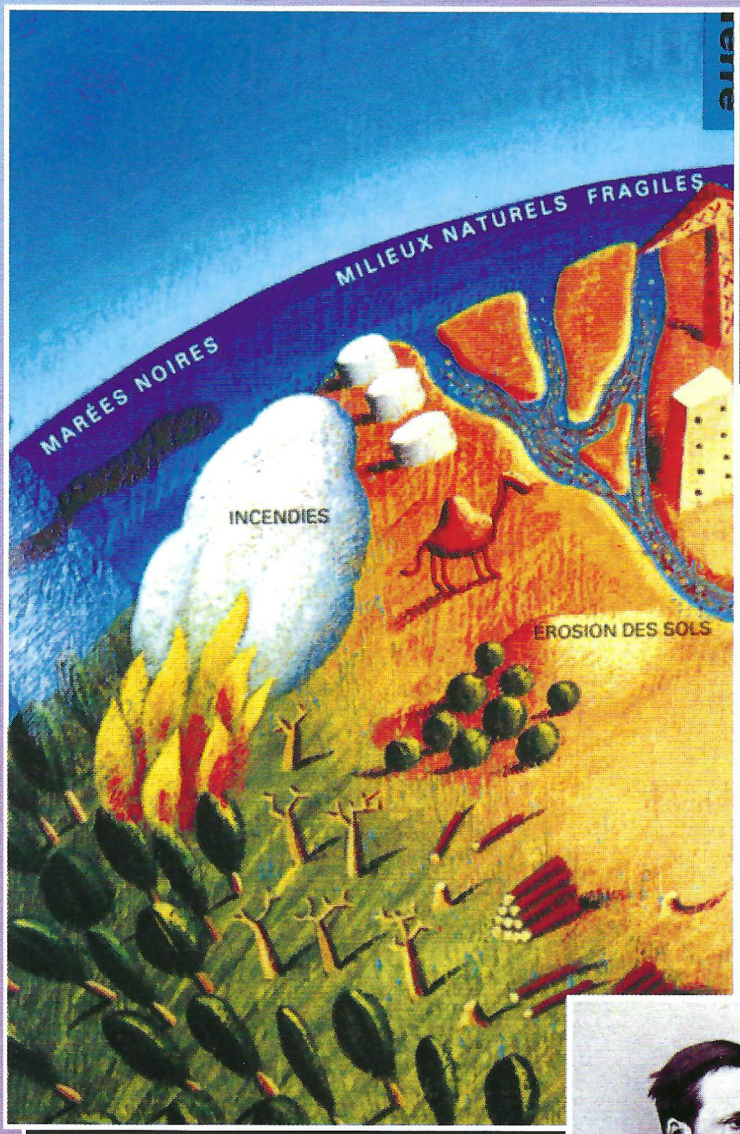
1ère exposition :
LES SAVANTS DE LA REVOLUTION
1 / Rôle des Scientifiques pendant la Révolution.
2 - 3 / Condorcet (philosophe).
4 - 5 / Lavoisier (chimiste).
6 - 7 / Bailly (astronome).
8 / Monge (mathématicien).
9 / Guyton de Morveau(chimiste).
10 / De Lalande (astronome).
11 / Portal (médecin).
12 / Le Collège de France sous l'Ancien Régime.
13 / Le Collège de France et la Révolution.
14 - 15 - 16 / Muséum d'Histoire Naturelle.
17 / Création de la Ménagerie.
18 / Protection du Patrimoine.
19 / Institut national des Sciences et des Arts.
20 / Conservatoire National des Arts et Métiers.
21 / Ecole normale de l'An III.
22 / Ecole Polytechnique.
23 / L'Enseignement à la veille de la Révolution.
24 / Les grands principes scolaires de la Révolution.
25 / L'idéologie pédagogique révolutionnaire.
26 / Le testament scolaire de la Convention.
27 / Le latin, le français et les sciences.
28 - 29 / La Médecine.
30 - 31 / La Mesure de la Méridienne.
32 / Le système métrique décimal.
33 / Les aérostats.
34 / Le Télégraphe de Chappe.

2ème exposition : PASTEUR
Création CNRS 1989
A l'occasion du centenaire de la mort de Pasteur.
Avec un film vidéo.
Vie et oeuvre de Pasteur.
Création Institut Pasteur 1996
14 panneaux plastifiés (100 X 78 cm)
1 / Famille de Louis Pasteur
2 / 1847 De la cristallographie à la dissymétrie moléculaire.
3 - 4 / 1862 Etude des fermentations.
5 / 1863 Etude sur les maladies des vins.
6 / 1865 Etudes sur les maladies des vers à soie.
7 / 1871 Travaux sur la bière.
8 -9 / 1877 Maladies infectieuses de l'animal et de l'homme.
10-11 / 1885 Prophylaxie de la rage.
12-13 / La gloire.
14 / L'institut Pasteur.

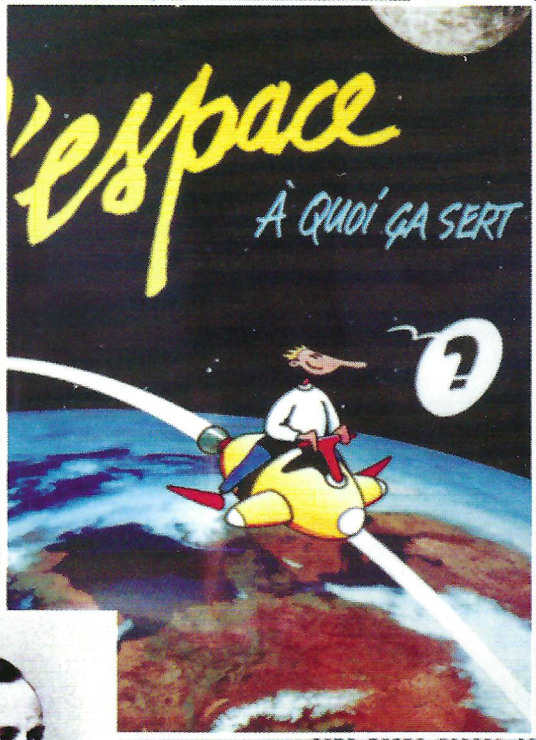
3ème exposition:
DECOUVERTE DE LA RADIOACTIVITE
Création SFEN 1996
11 panneaux plastifiés (100 X 70 cm)

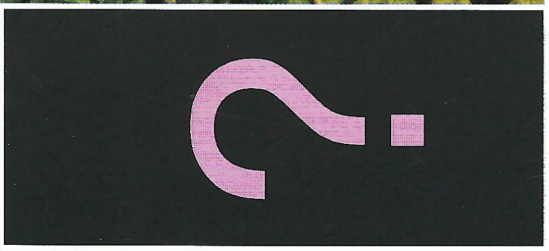
1 - 2 / Henri Becquerel et sa famille.
3 / Pierre Curie et ses découvertes.
4 - 5 / Marie Sklodowska en Pologne, à Paris.
5 - 6 / Pierre et Marie Curie 1895 - 1903
1903 - 1906.
7 / Marie Curie pendant la guerre 1914-1918.
8 / La dernière période:1920 - 1934.
9 - 10 - 11 / Hommages philatéliques à Marie Curie.
Deux vidéos sur la radioactivité.

4ème exposition : LES PRINCIPES DE NEWTON (en anglais).
1 / Historical Background to Principia.
2 / Contest for Principia in the 17 th Century.
3 / Newton's life before Principia.
4 / Writing Principia.
5 / Content and Argument of Principia.
6 / Réception of Principia.
7 / Newton's life after Principia.
8 / Principia in the 18 th Century.
9 / Principia in the 19 th Century.
10 / Principia in the 20 th Century.


MARÉES NOIRES
MILIEUX NATURELS FRAGILES
INCENDIES
ÉROSION DES SOLS

Newton's
PRINCIPIA
1687


espace
À QUOI ÇA SERT
?


?

espace
À QUOI ÇA SERT
?
PRÉSENTENT

Le système métrique décimal
Pourquoi la mer est-elle salée ?