



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

DIVISION NATIONALE DES EAUX
MINÉRALES ET THERMALES

DOCUMENT PUBLIC

Memento technique des eaux minérales

Programme réalisé dans le cadre des actions de service public du BRGM

M.Lopoukhine et P.Vigouroux
Centre thématique Eau / Antenne Eau Minérale

Juin 1998
R 40145



Mots clés : Eau minérale, géophysique, forage, gisement, pompage, isotopes, analyses, gaz carbonique, suivi d'exploitation, protection.

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

Lopoukhine M. et Vigouroux P. (1998)

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

AVERTISSEMENT

Une enquête réalisée en 1994, auprès de toute la DRIRE ayant à intervenir dans le domaine des eaux minérales, a permis d'identifier un certain nombre de sujets sur lesquels un besoin d'information technique était exprimé.

Pour répondre à cette attente, la DIVISION NATIONALE DES EAUX MINÉRALES ET THERMALES DU MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, a décidé d'éditer une série de notes techniques brèves, pratiques aussi didactiques que possible.

Le Centre Thématique Eau, Antenne Eau Minérale du BRGM, a été chargé de ce travail, au rythme de 4 notes par an.

Au terme de la troisième année, il est apparu que l'ensemble ainsi constitué, méritait également, par l'éventail des sujets traités, d'être diffusé par le BRGM sous forme de rapport.

Les différents sujets abordés le sont évidemment sous l'angle de leur application aux eaux minérales ; néanmoins, dans la plupart des cas, les considérations développées peuvent être étendues, en tout ou partie, au domaine, plus large, des eaux souterraines.

SOMMAIRE
DES NOTES TECHNIQUES

- N. T. n° 1 : ETUDE D'UN GISEMENT D'EAU MINÉRALE
LES MÉTHODES MISES EN OEUVRE
- N. T. n° 2 : LES TECHNIQUES DE FORAGE UTILISÉES EN EAU
MINÉRALE
- N. T. n° 3 : LE SUIVI DU FORAGE D'EAU MINÉRALE
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE
- N. T. n° 4 : EQUIPEMENT DE FORAGE D'EXPLOITATION D'EAU
MINÉRALE - APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE
- N. T. n° 5 : LE POMPAGE DE QUALIFICATION
- N. T. n° 6 : PÉRIMÈTRE SANITAIRE D'ÉMERGENCE
- N. T. n° 7 : LES TECHNIQUES ISOTOPIQUES
APPLICATION AUX EAUX MINÉRALES
- N. T. n° 8 : REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES RÉSULTATS
D'ANALYSES EAU MINÉRALE
- N. T. n° 9 : LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES EN
RECHERCHE D'EAU MINÉRALE
- N. T. n° 10 : LES EAUX MINÉRALES ET LE GAZ CARBONIQUE
- N. T. n° 11 : ABANDON ET FERMETURE DES FORAGES
- N. T. n° 12 : MESURES ET SUIVI D'EXPLOITATION DES ÉMERGENCES
D'EAU MINÉRALE



Etudes d'un gisement d'eau minérale Les méthodes mises en oeuvre

Note technique n° 1

Novembre 1995

R E S U M E

Les différentes méthodes permettant l'accès à la connaissance, donc une meilleure maîtrise des ressources d'eau minérale sont présentées.

Leur complémentarité est abordée et tient compte du contexte et de l'état d'avancement de l'étude du gisement.

Ceci met en évidence qu'une méthodologie stricte ne peut être retenue a priori, mais que seul un agencement de ces techniques, au cas par cas, peut faire avancer la gestion des ressources.

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION	1
2. METHODES GEOLOGIQUES.....	2
2.1. Finalité.....	2
2.2. Moyens.....	3
2.3. Intérêt.....	3
3. METHODES HYDROGEOLOGIQUES	3
3.1. Finalité.....	3
3.2. Moyens.....	4
3.3. Intérêt.....	4
4. METHODES HYDROGEOCHIMIQUES.....	5
4.1. Objectifs	5
4.2. Moyens.....	6
4.3. Intérêt.....	7
5. METHODES GEOPHYSIQUES	8
5.1. Finalité.....	8
5.2. Moyens.....	8
5.3. Intérêt.....	9
6. CONCLUSIONS.....	10
BIBLIOGRAPHIE	11

1. INTRODUCTION

L'étude d'un gisement d'eau minérale correspond à une logique d'acquisition de données sur un site particulier avec l'objectif d'apporter des éléments de réponses à des questions spécifiques relatives à la ressource en tant que telle (production, caractéristiques) ou à la protection de cette ressource.

Il est utile de rappeler la définition d'un gisement d'eau minérale¹ pour préciser les objectifs qui peuvent être fixés aux études de gisement :

"un gisement d'eau minérale est l'ensemble de la structure géologique souterraine, depuis la zone d'alimentation et jusqu'à la zone d'émergence, située au droit d'une zone géographique bien déterminée, et de laquelle il est possible d'extraire, moyennant la mise en oeuvre de techniques appropriées, une eau souterraine de qualité déterminée, stable, reproductible, et identique, aux fluctuations naturelles près, à la qualité de la source le cas échéant, déjà autorisée et reconnue".

Compte-tenu de cette définition, l'étude d'un gisement d'eau minérale pourra concerner l'acquisition de données en vue de préciser un ou plusieurs des aspects suivants :

- ⇒ géométrie du gisement ;
- ⇒ modes d'alimentation et de circulation des eaux minérales ;
- ⇒ modalités de captage de la ressource pour augmenter la protection sanitaire d'ouvrages existants et/ou la capacité de production globale d'une ressource identifiée (éventuellement reconnue par les instances administratives).
- ⇒ modalités d'exploitation d'une ressource identifiée, en terme de quantité et de qualité, à partir d'un ouvrage existant, avec la garantie de maintenir un caractère "stable, reproductible et identique" du fluide.

¹ Rapport BRGM - mars 1994 - R37964 SGR/RHA 94

Il existe différentes méthodes d'étude de gisement dont la mise en oeuvre dépend des informations recherchées. Ces méthodes, identifiées ci-après, sous quatre rubriques distinctes, ont été classées dans un ordre précis pouvant correspondre à une progression logique dans les investigations. Cependant, il convient de considérer que ce type de progression doit être ajusté à chaque contexte local étudié. L'étude d'un gisement, domaine des sciences de la terre qui n'entre donc pas dans la catégorie des sciences exactes, suppose un raisonnement par approche successive avec élaboration toujours renouvelée d'hypothèses, confirmées ou infirmées par une méthode adaptée, jusqu'à obtention des résultats attendus.

On notera en outre que le domaine particulier des eaux minérales fait qu'il existe généralement des archives sur un site. Ainsi l'étape préliminaire au choix d'une méthode d'étude de gisement concernera la réalisation d'un état des lieux de connaissance du site, notamment en terme d'hypothèse de circulation formulée. Cette analyse permet de définir un programme adapté en jouant sur les différentes méthodes disponibles.

Les méthodes de prospection qui vont être présentées font appel aux techniques géologiques(1), hydrogéologiques(2) (y compris les pompages d'essai), hydrogéo-chimiques(3) (y compris les isotopes et les gaz des sols) et géophysiques(4). Les techniques s'adaptent aux contextes rencontrés (non exclusifs les uns des autres) : sédimentaire stratifié, sédimentaire plissé, cristallin fracturé, volcanique, comme au type d'information recherché et au niveau de connaissance souhaité du site.

2. METHODES GEOLOGIQUES

2.1. FINALITE

Il s'agit d'abord de préciser les structures géologiques qui ordonnent la zone étudiée ainsi que les types et familles de fractures qui les accompagnent : discontinuité, fractures, plis, régime de contraintes, en gros la tectonique locale déterminante pour la connaissance de la structure qui contrôle la circulation des fluides. Parallèlement, l'étude de ces formations géologiques permet de prévoir les qualités de l'éventuel aquifère et donne un cadre au chimisme de l'eau (Fig. 1 - page 2 bis).

Les méthodes géologiques seront mises en oeuvre au "démarrage" d'une étude de gisement pour la conceptualisation d'un mode de fonctionnement des circulations d'eau minérale. On parle de modèle hydrominéral dont les résultats des investigations successives doivent permettre d'affiner la connaissance.

Les méthodes géologiques constituent une approche par observations in situ avec développement d'un concept.

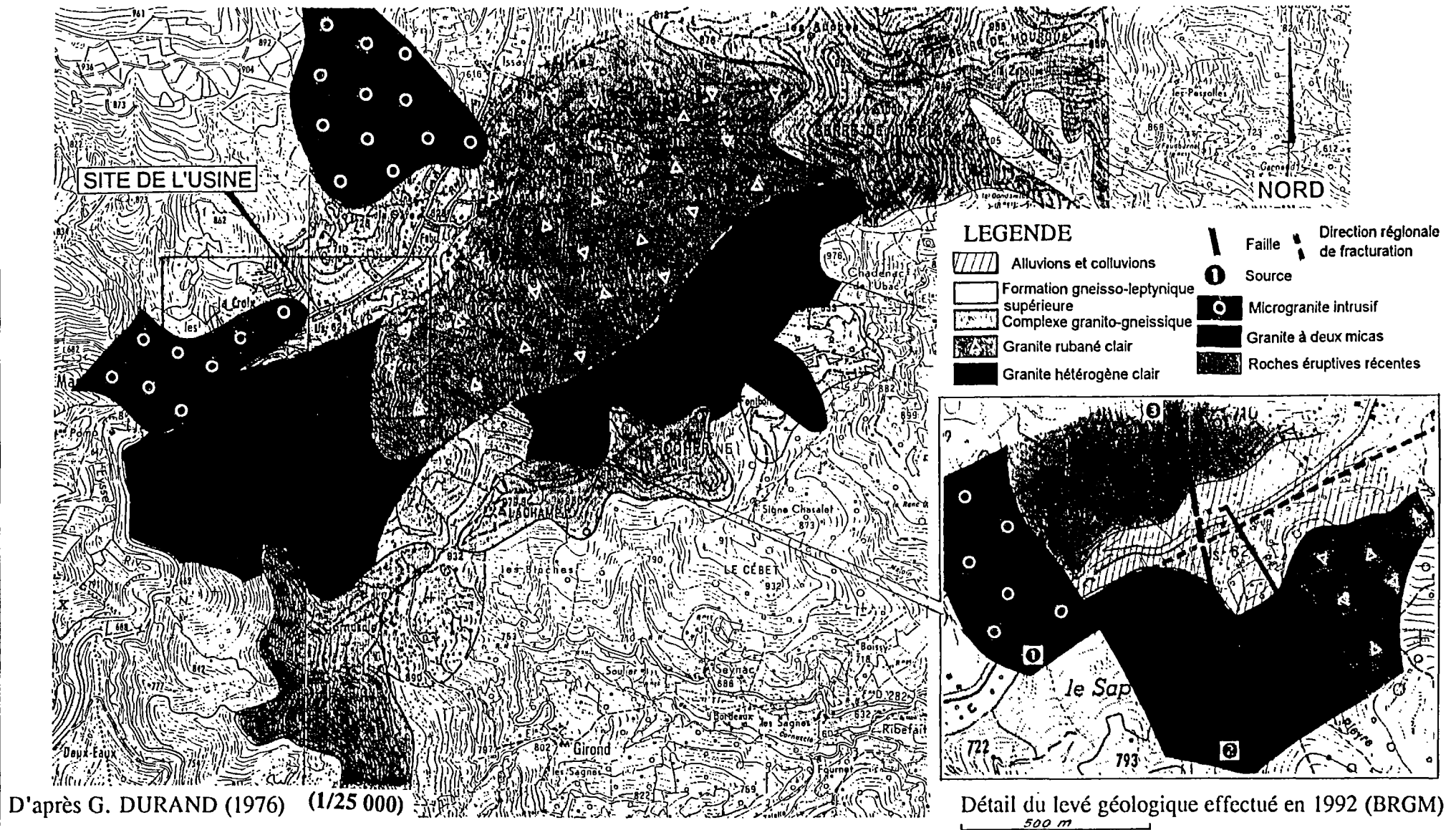


Fig. 1 : Exemple interprétation géologique et structurale - site d'Arcens

2.2. MOYENS

La géologie dispose généralement d'outils précieux pour les zones situées en France (carte géologique à 1/50 000, photos aériennes voire images satellite). Des observations et mesures (orientation des structures) sur le terrain peuvent s'avérer nécessaires pour se caler, de même que des analyses minéralogiques et/ou chimiques (voire isotopiques) des solides, pour définir les conditions de l'interaction roche/eau.

2.3. INTERET

Il est fondamental de disposer d'informations pour préciser le cadre géologique des sites d'eau minérale. Le degré de précision des données géologiques à acquérir dépendra des objectifs qui pourraient être fixés par un exploitant.

Ainsi, l'étude en vue d'un recaptage de ressource, en un point donné, nécessitera d'aller vers une approche géologique locale très détaillée même si on part d'une approche générale. Il y aura focalisation sur un point donné. Une étude de protection de gisement demandera une approche géologique plus large (parfois régionale). L'expérience montre qu'une bonne connaissance initiale de la géologie permet de mieux orienter les méthodes d'investigation associées par l'élaboration de "modèle de circulation" dont la précision sera affinée au fur et à mesure de l'obtention de données complémentaires.

La connaissance de plus en plus approfondie de la géologie permet d'optimiser les moyens à mettre en oeuvre, que ce soit pour assurer une production plus importante d'un gisement, ou pour en assurer une protection plus efficace.

3. METHODES HYDROGEOLOGIQUES

3.1. FINALITE

Les méthodes hydrogéologiques viennent s'appuyer naturellement sur le modèle conceptuel (hydrominéral) développé à partir des informations disponibles (bibliographie et méthodes géologiques). Elles constituent une approche par mesures directes.

L'étude hydrogéologique sert à évaluer la ressource en eau au plan quantitatif, à identifier le circuit de l'eau (zone de recharge, exutoires) et le(s) réservoir(s) potentiel(s). Si l'on dispose souvent déjà d'un ouvrage de captage, il est fréquent d'avoir à implanter des forages pour garantir l'approvisionnement en quantité et en qualité.

Les questions qui sont posées à ce stade sont :

- ⇒ quels sont les différents niveaux producteurs ?
- ⇒ quel est le débit d'exploitation du niveau producteur représentatif de la ressource recherchée ?

3.2. MOYENS

Après l'analyse des données existantes, des observations comme le relevé des éventuels piézomètres, le suivi des débits des sources, des mesures de perméabilité, sans oublier les écoulements superficiels, peuvent renseigner utilement sur le site. Quand existe(nt) un (des) forage(s), des pompages d'essai courte et longue durée permettent de préciser l'étendue de la ressource (méthodologie à respecter dans le cas de réservoirs carbogazeux). Les données obtenues peuvent être alors traitées et alimenter une modélisation hydrodynamique (cas rares d'aquifères sédimentaires stratifiés).

La réalisation d'ouvrages neufs entre dans le cadre des méthodes d'investigation d'un gisement. La conception d'un ouvrage et le suivi de sa réalisation auront pour objectifs d'apporter des données utiles sur le plan de la géologie, de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie. L'ouvrage de reconnaissance (éventuellement transformable en ouvrage d'exploitation) constitue le moyen direct de contrôle de validité d'une hypothèse de circulation.

3.3. INTERET

L'approche hydrogéologique présente un intérêt très tangible en terme de débit exploitable en un point donné. Il s'agit d'une approche très quantitative d'évaluation de la capacité de production d'un gisement par des ouvrages existants, évitant toute surexploitation qui pourrait nuire, à court ou moyen terme, au caractère stable de l'eau minérale et donc poser des problèmes au niveau de son arrêté d'autorisation d'exploitation (existant ou futur). C'est pourquoi, les essais de qualification ont pour objectif de préciser les interférences entre ouvrages et la stabilité dans le temps des paramètres (hydrauliques et physico-chimiques) des différents ouvrages exploitables.

4. METHODES HYDROGEOCHIMIQUES

4.1. OBJECTIFS

⇒ Hydrochimie classique

L'étude de la chimie des eaux présentes au voisinage du site étudié va permettre :

- d'identifier les caractéristiques physico-chimiques de la ressource visée (composition + conditions de pression et températures profondes) ;
- d'évaluer les modifications de qualité que celle-ci peut subir au cours de sa remontée, de son traitement éventuel et de son exploitation ;
- d'informer sur les interactions subies lors de son circuit souterrain (gaz, roches, minéraux ...) permettant de préciser celui-ci.

La géochimie isotopique menée parallèlement complétera ce type d'information par des évaluations de temps de transit souterrain, la détermination des zones de recharge (altitude), des transformations éventuelles subies par l'eau (phase d'évaporation, de mélanges, interactions avec le CO₂, avec les minéraux profonds, ..), de l'origine de certains éléments (soufre et carbone dissous, hélium des gaz libres).

⇒ Géochimie des gaz dans les eaux (libres et dissous)

Le dosage des gaz libres et dissous permet d'interpréter les résultats obtenus par les mesures de gaz dans les sols (CO₂, radon). Ce dosage est en outre indispensable à la compréhension de l'évolution chimique de l'eau (avec les variations de pression et de température notamment). La mesure de certains gaz permet de compléter la caractérisation de l'état chimique du fluide : ainsi, la mesure d'H₂S in situ (en forage par exemple) contribue à établir l'état redox des eaux considérées.

⇒ Géochimie des gaz dans les sols (Fig. 2 - page 5 bis)

Utilisant les propriétés d'émanation des gaz (CO₂, radon, principalement) à travers les formations géologiques, le dosage des gaz dans les sols permet de préciser les informations fournies par l'étude tectonique et éventuellement géophysique : zones de fractures, de circulation (que l'on peut ainsi distinguer des zones de circulation à eaux superficielles). La mesure du CO₂ sera notamment adaptée aux ressources carbogazeuses.

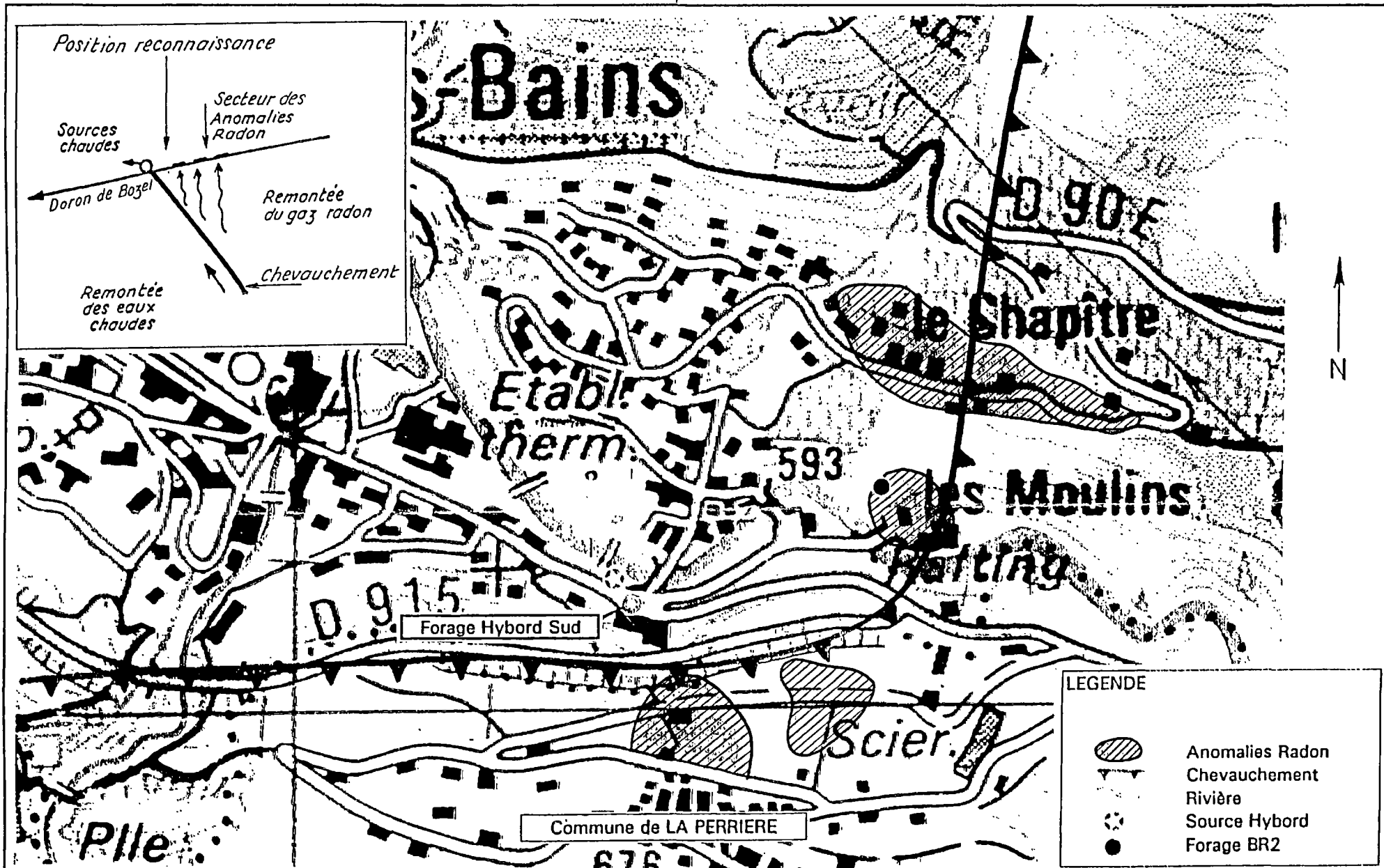


Fig. 2 : Exemple cartographie des gaz du sol (radon) - site de Brides les Bains

⇒ Biogéochimie

La caractérisation de la qualité de l'eau étudiée passe par une connaissance minimale de sa flore bactérienne, pour des raisons sanitaires évidentes, mais également en raison de l'influence que les bactéries ont sur la chimie de l'eau elle-même (déplacement du niveau redox, précipitation d'espèces ...).

4.2. MOYENS

Les mesures physico-chimiques in situ du maximum de paramètres des espèces instables (température, pH, conductivité, potentiel redox, oxygène dissous, alcalinité, le cas échéant rapport volumique gaz libre/liquide, teneurs en sulfures, fer, manganèse,...) constituent le préalable de toute étude. Dans certains cas (forages plus ou moins profonds), pour éviter une transformation du fluide originel, les mesures physico-chimiques doivent être réalisées par une sonde multiparamètres et l'eau échantillonnée par un préleveur de fond. Un suivi dans le temps des paramètres et espèces clés est en général nécessaire ; il peut s'obtenir par des appareils d'acquisition de données munis de sondes diverses (pH, conductivité, potentiel redox, ...). Après un prélèvement et un conditionnement "ad hoc", sont analysés en laboratoire : les gaz, les éléments majeurs et certaines traces (soit imposées par la directive européenne, soit permettant de préciser effectivement la chimie du fluide ou encore pour les deux raisons). Ces données (résultats analytiques + mesures de terrain) alimenteront une modélisation hydrogéochimique qui déterminera quelles sont les espèces en solution, les niveaux de saturation vis-à-vis de minéraux cardinaux (risques d'entartrage, de corrosion et de modification de la composition chimique) en fonction de différentes conditions de température et de pression (profondeur). A ce stade, il est également possible d'obtenir la température à laquelle le fluide s'est équilibré en profondeur (géothermométrie).

Le dosage des isotopes stables de l'eau (deutérium, oxygène 18) est utile pour connaître l'origine et le circuit suivi par l'eau. D'autres isotopes stables (^{34}S , ^{15}N) permettent de mettre en évidence certaines interactions. Les isotopes radiogéniques sont utilisés en tant qu'"horloges" pour dater les eaux. On utilise, suivant la période considérée, le tritium (30 ans), le carbone 14 (45 000 ans) et bientôt le chlore 36 (3.10^6 ans).

Les gaz libres et/ou dissous sont mesurés aussi pour être corrélés (radon) avec les gaz des sols, pour repérer l'origine de la phase gazeuse (rapport Helium 3/Helium 4). La mesure de turbidité (ou un passage de caméra vidéo) en forage est par ailleurs un moyen direct de déterminer la pression de point de bulle et ainsi, de caler le modèle.

Les gaz des sols peuvent être utilisés quel que soit le terrain ; ils sont dosés soit par colorimétrie (tubes "Draeger" pour CO_2) soit par scintillométrie (pour le radon). Des logiciels permettent d'optimiser les lignes d'isovaleur afin de délimiter les zones anormales.

4.3. INTERET

L'intérêt de la mise en oeuvre des méthodes hydrogéochimique diffère en fonction de l'avancement de l'étude.

☐ En phase d'investigation préliminaire en surface

Elles peuvent permettre d'appréhender des zones de circulations préférentielles :

- la prospection des gaz dans les sols donne en général des résultats intéressants sans que l'on sache toujours les interpréter et il est impératif de corréler ces données avec les autres (tectonique, géophysique, chimie des gaz, de l'eau) et également de bien cerner le contexte des sols (humidité, matière organique, dépôts d'alluvions uranifères, pression atmosphérique ...) ;
- certains éléments traces, parfois négligés dans les analyses, peuvent être avantageusement utilisés comme traceurs (lithium à la Léchère (73), bore et strontium dans certaines sources pyrénéennes) ;
- des données thermiques, en contexte hydrothermal, peuvent être valorisées en surface dans le cas de plusieurs sources.

☐ En phase de reconnaissance par forage

Elles peuvent permettre de différencier des aquifères superposés. Dans ce cas, des diagraphies en forage (température, conductivité, prélèvements sélectifs ...) permettront de ne capter que les horizons correspondant au gisement recherché. En outre, certaines analyses (isotopes) permettront de préciser des structures de gisement (zone de recharge).

☐ En phase d'exploitation d'un ouvrage particulier dans un gisement donné

Les mesures hydrogéochimiques permettent de préciser la stabilité du ou des fluide(s) (eau et gaz) afin de définir une exploitation adaptée permettant de garantir la stabilité de l'eau minérale. Ces mesures sont valorisées également pour définir les traitements réalisables (dans la limite des contraintes réglementaires).

5. METHODES GEOPHYSIQUES

5.1. FINALITE

Les objectifs de la géophysique consistent, si besoin est, à confirmer et préciser les interprétations et les informations fournies par la tectonique et l'analyse des gaz des sols relatives à la structure des terrains concernés comme la définition des zones de circulation de l'eau minérale.

La géophysique peut également concerner une analyse plus globale d'un gisement en terme de réservoir de dimension limitée. Il peut s'agir alors de préciser des cartes de substratum et de toit d'un aquifère particulier.

Les méthodes géophysiques sont des méthodes d'approche indirectes, elles concernent le traitement d'un signal particulier pour répondre à des questions précises du type :

- existe-t-il un niveau de fracturation à telle profondeur correspondant à tel axe structural ?
- existe-t-il une limite de flux (alimentation ou barrière) entre tel et tel point du gisement ?
- quel sont le pendage et la direction des fractures rencontrées dans tel forage ?

On le conçoit les méthodes géophysiques viennent à l'aval des méthodes géologiques et/ou hydrogéologique (forage), elles ne peuvent être employées utilement sans réflexion préalable.

5.2. MOYENS

La géophysique dispose de nombreuses méthodes dont les plus couramment utilisées dans le cadre de gisement d'eau sont :

- ☛ **les méthodes de prospection électriques** dont la méthode des résistivités (trainés, sondages) est la plus fréquemment mise en oeuvre. Elle permet de distinguer des contrastes entre les formations et ainsi, après calage, des zones de circulation potentielle ou de présence d'un horizon aquifère .
- ☛ **les méthodes de prospection sismique de surface**. Plus lourdes à mettre en oeuvre que les précédentes (coût élevé), ces méthodes nécessitent des moyens de traitement de l'information sophistiqués. Elles permettent des investigations plus poussées en profondeur (Fig. 3 - page 8 bis) ;

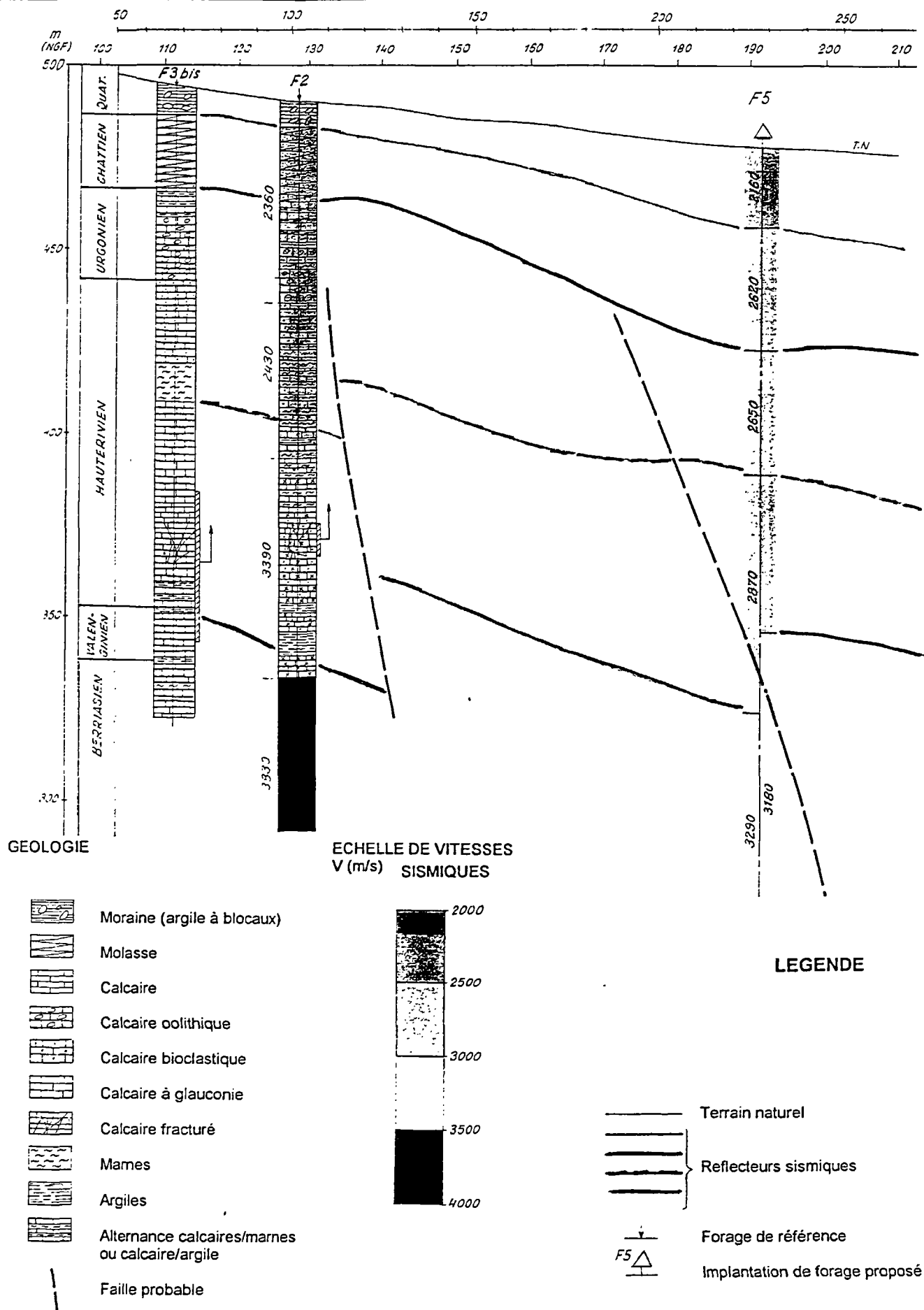


Fig. 3 : Exemple prospection géophysique sismique - site de Divonne les Bains

- ☞ **les méthodes de prospection en forages** (diagraphies PS, gamma-ray, BHTV ...) permettent de préciser soit des contrastes entre niveaux superposés, soit des orientations et directions de fracturations (selon les contextes géologiques) ;
- ☞ **les méthodes de prospection sismique entre forages ou couplées forages/surface** (tomographie sismique) permettent de préciser des structures particulières à proximité d'ouvrages existants (fractures, intrusions).

5.3. INTERET

Les méthodes géophysiques permettent d'acquérir des données relatives au sous-sol sur des domaines étendus grâce à une approche indirecte par opposition aux forages qui fournissent des informations directes en un point précis. Cependant, ces méthodes nécessitent des calages, sur la base de données forage, pour valider les interprétations. Corréliées à d'autres méthodes (géologie, prospection gaz ...), ces méthodes peuvent contribuer de façon significative à l'élaboration des schémas de gisement donc de circulation des eaux minérales.

6. CONCLUSIONS

L'étude d'un gisement d'eau minérale met en oeuvre différentes méthodes complémentaires dont l'articulation logique dépend du problème posé, de la précision attendue et des moyens disponibles.

S'il paraît fondamental que toute étude de site soit basée sur une analyse historique d'une part et sur une approche géologique initiale d'autre part, permettant de préciser un contexte particulier, le but final d'une étude de gisement, à un moment donné, peut être variable selon que l'on souhaite identifier une zone de captage en un point donné afin d'augmenter une capacité de production, ou que l'on souhaite mieux connaître une extension de gisement pour en assurer la protection. Le choix des méthodes dépend ainsi étroitement non seulement du contexte géologique local, mais également du but poursuivi.

Quoi qu'il en soit la notion d'étude de gisement reste une notion "ouverte" pour tous les sites d'eau minérale qui font généralement l'objet de façon constante de compléments d'investigation afin d'accroître la connaissance globale, a priori non limitée.

Ce dernier point amène à considérer que l'on ne peut pas exiger une connaissance précise et complète d'un gisement mais seulement contrôler que les réflexions pour en assurer une exploitation rationnelle sont bien menées et que les moyens nécessaires sont mis en oeuvre.

===

BIBLIOGRAPHIE

- Principes et méthodes de l'hydrogéologie - G. CASTANY - Edition DUNOD - 1967.
- Hydrogéologie quantitative - G. de MARSILLY - Edition MASSON - 1981.
- Dictionnaire français d'hydrogéologie - G. CASTANY - J. MARGAT - Edition BRGM 1977.
- Hydraulique souterraine - G. SCHNEEBELI - Edition EYROLLES - 1978
- Géophysique appliquée à l'hydrogéologie - JL. ASTIER - Edition MASSON - 1971
- L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau - J. RODIER - Edition DUNOD 1971.



Les techniques de forage utilisées en eau minérale

Note technique n° 2

Novembre 1995

R E S U M E

Un ouvrage d'eau minérale utilise l'ensemble des techniques et des matériels existants dans le domaine du forage.

Cependant, la spécification de cette entreprise réside dans la prise en compte préalable de tous les paramètres afin d'optimiser l'ouvrage.

Cette sélection se base sur des considérations non seulement techniques liées à la géologie, à la géométrie de l'ouvrage et à la quantité d'information à acquérir, mais également sécuritaires concernant l'ouvrage et aussi la ressource, ainsi que bien sûr financières.

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION	1
2. LES METHODES DE FORAGE.....	2
2.1. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU (MFT).....	2
2.2. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU AVEC TUBAGE A L'AVANCEMENT	3
2.3. FORAGE ROTARY CIRCULATION DIRECTE	4
2.4. FORAGE EN CIRCULATION INVERSE	6
2.5. FORAGE CAROTTE	7
2.6. FORAGE PAR BATTAGE.....	7
2.7. FORAGE PAR HAVAGE.....	8
3. CHOIX D'UNE METHODE DE FORATION - LES PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE.....	10
3.1. NATURE GEOLOGIQUE DES TERRAINS TRAVERSES	10
3.2. PROFONDEUR FINALE DE L'OUVRAGE	10
3.3. NATURE DE L'OUVRAGE REALISE (RECONNAISSANCE OU EXPLOITATION).....	11
3.4. QUALITE DES FLUIDES DES RESERVOIRS.....	11
3.5. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER.....	11
4. CONCLUSIONS.....	12
BIBLIOGRAPHIE	13

1. INTRODUCTION

S'il existe différentes méthodes d'étude d'un gisement d'eau minérale, la réalisation d'un forage constitue la méthode la plus directe d'approche des caractéristiques du milieu souterrain en un point donné.

La réalisation d'un forage dans un gisement nécessite une programmation rigoureuse compte tenu des aspects suivants :

- ☞ s'agissant d'une action sur le sous-sol, elle constitue un risque pour le milieu souterrain et pour les différentes entités géologiques concernées par la foration. Ce risque peut concerner le transfert d'éléments indésirables vers certains niveaux producteurs (contamination chimique ou bactériologique). Il peut également se produire des phénomènes de mélanges entre différents niveaux pouvant induire des modifications de qualité voire de quantité (jusqu'à la perte d'une ressource) ;
- ☞ s'agissant d'une action ayant un objectif technique déterminé et représentant un coût en général non négligeable, l'ouvrage doit être conçu pour une acquisition optimale de données compte tenu des moyens pouvant être mobilisés.

Ainsi, toute action de foration entreprise sur un gisement d'eau minérale doit s'accompagner d'une réflexion préalable sur :

- ⇒ la mise en oeuvre de la technique de foration la plus appropriée ;
- ⇒ la réalisation d'un suivi technique adapté ;
- ⇒ la mobilisation d'une entreprise de forage qualifiée pour le type de forage envisagé.

2. LES METHODES DE FORAGE

Il existe de nombreuses méthodes de foration dont la mise en oeuvre dépend de paramètres très divers. Le chapitre présente les méthodes de forages en tant que telles avec leurs avantages et inconvénients relatifs. Le chapitre suivant précisera les modalités de sélection de ces méthodes selon les critères usuels pour le domaine de l'eau minérale.

2.1. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU (MFT) (Fig. 1 - page 2 bis)

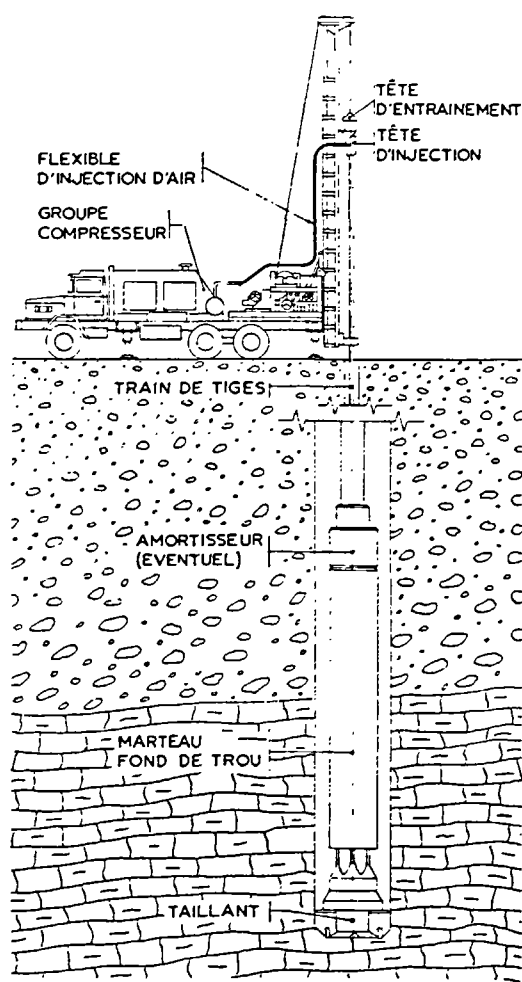
□ *Principe*

Cette méthode de forage utilise la percussion assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui même en rotation. L'énergie utilisée pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute pression (10-25 bars). C'est un procédé très intéressant en recherche hydrogéologique et principalement en terrains durs.

Un marteau pneumatique équipé de taillants est fixé à la base d'un train de tiges et animé en percussion par envoi d'air comprimé dans la ligne de sonde, d'où le nom de "marteau fond de trou".

□ *Avantages*

- Avancement rapide et profondeur d'investigations pouvant dépasser les 300 m de profondeur (fonction du diamètre et de la puissance du compresseur d'air) ;
- Bonne observation des cuttings (coupe géologique) et des zones productrices (suivi foration) ;
- Fluide de forage (air) bien adapté au forage d'eau en général de par l'absence de produit de foration (pas d'interférence entre la ressource et des boues ou de l'eau).



Principe du forage au
marteau fond-de-trou
(D'après document DAMAT,
1981)

Fig. 1 : Schéma de principe foration Marteau Fond de Trou (M.F.T)

❑ *Inconvénients*

- le fluide "air" peut perturber en foration les observations relatives à la qualité du fluide d'un niveau producteur par oxydation d'éléments ou en occultant des venues de gaz. La confirmation de la qualité du fluide (eau et gaz) d'un niveau producteur doit fréquemment être réalisée par pompage associé ;
- Interprétation délicate du niveau de production d'un horizon reconnu (débit) par mesure en soufflage (air lift) à l'aide de l'équipement de foration. Les données obtenues en foration MFT, quant aux débits des horizons traversés, doivent être prises en compte avec réserve ; Il convient de considérer que les débits obtenus en fonction à l'air sont toujours optimistes ;
- Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés ou plastiques ;
- Risque de formation de bouchons de cuttings, nécessitant de fréquents nettoyages du trou par soufflage. Ce phénomène n'existe pas lorsque l'ouvrage est totalement sec ou lorsque le débit des niveaux producteurs est suffisant pour permettre un bon nettoyage par circulation ;
- Nécessité d'utilisation de compresseurs très puissants voire de surpresseurs en cas de foration sous des hauteurs d'eau importantes.
- Mauvaise identification de chaque niveau producteur en cours de foration, le fluide recueilli en tête d'ouvrage intégrant l'ensemble des horizons traversés.

Il convient de noter que la foration MFT à l'air est parfois couplée à l'emploi de mousse de forage (injectée dans le circuit d'air) pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des cuttings. S'agissant d'un contexte "eau minérale", le choix d'une mousse "inerte" doit être une préoccupation pour l'opération.

2.2. FORAGE AU MARTEAU FOND DE TROU AVEC TUBAGE A L'AVANCEMENT (Fig. 2 - page 3 bis)

❑ *Principe*

Identique à la technique MFT "classique" exposée ci-avant, cette méthode concerne la mise en place d'un tubage des parois du trou au fur et à mesure de sa foration.

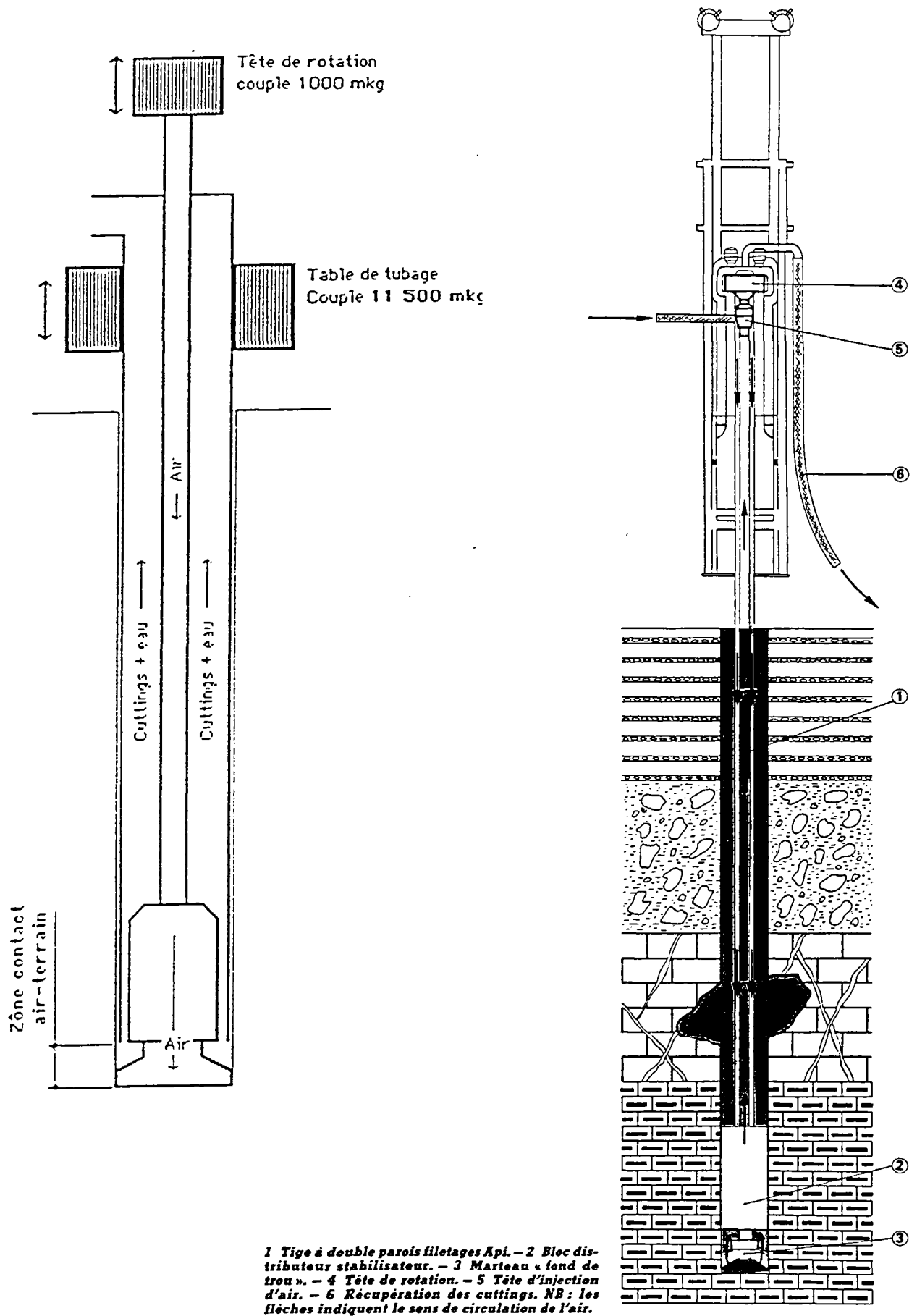


Fig. 2 : Schémas de principe foration tubage à l'avancement et circulation inverse

Elle met en oeuvre un taillant pilote avec aléseur excentrique qui permet de forer des trous d'un diamètre légèrement supérieur au diamètre extérieur des tubes. Le tubage est ainsi enfoncé progressivement à la suite de l'aléseur sous l'effet de son propre poids et de l'énergie de percussion du marteau. Les tubes sont solidarisés entre eux soit par soudure, soit par filetage. Le taillant excentrique se déploie par rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, une rotation en sens inverse en fin de foration permet son repli et la remontée de la garniture. Comme en foration au marteau fond de trou classique, l'évacuation des cuttings est là aussi assurée par la remontée de l'air, ici entre tiges et tube.

❑ *Avantages*

- Possibilité d'utiliser une foration air dans un contexte géologique peu stable ;
- Bonne observation des cuttings et zones productrices ;
- Meilleure individualisation des niveaux producteurs au moment de la foration, sans mélange avec des niveaux supérieurs partiellement obturés par le tubage mis en place.

❑ *Inconvénients*

- idem au MFT classique à l'exception de la foration dans les terrains non consolidés.

2.3. FORAGE ROTARY CIRCULATION DIRECTE (Fig. 3 - page 4 bis)

❑ *Principe*

La méthode de foration rotary utilise un outil (trépan) monté au bout d'une ligne de sonde (tiges vissées les unes aux autres), animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale sous l'effet d'une partie du poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique.

Le mouvement de rotation est imprimé au train de tiges et à l'outil par un moteur situé sur la machine de forage en tête de puits. Les tiges sont creuses et permettent l'injection de boue au fond du forage.

Les outils utilisés en rotation sont des trépan de plusieurs types en fonction de la dureté des terrains rencontrés (outils à lames, outils à pastilles, molettes ou tricône, outils diamantés ou à carbures métalliques).

Au-dessus du trépan, on peut placer une ou plusieurs masses-tiges très lourdes qui accentuent la pression verticale sur l'outil et favorisent la pénétration et la rectitude du trou.

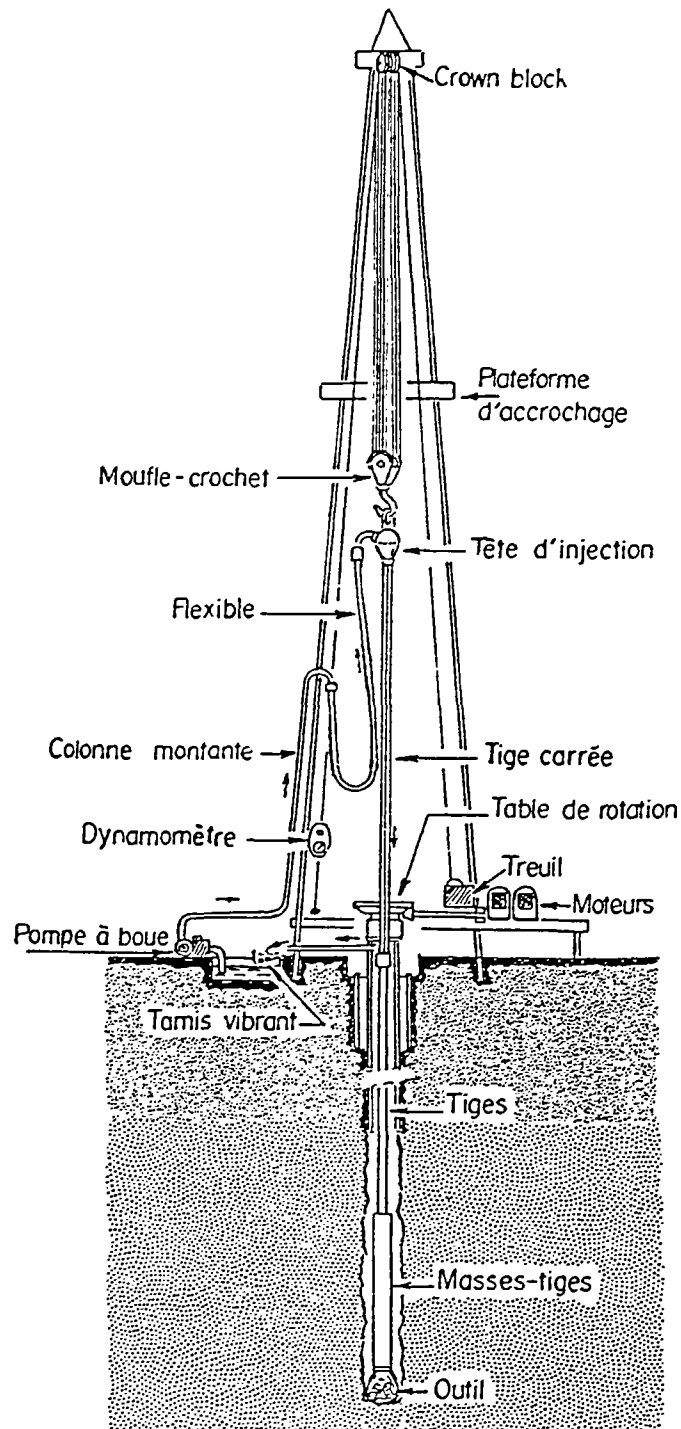


Fig. 3 : Dispositif schématique d'un atelier de forage rotary

Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outils et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou).

☐ *Avantages*

- La profondeur du forage peut être très importante, la foration n'est pas perturbée par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.
- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- Le forage au rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake.

☐ *Inconvénients*

- Nécessité d'un fluide de forage qui ne permet pas d'observation directe de la qualité des eaux des formations traversées ;
- colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite) ;
- difficulté d'observation des cutting, la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement cet inconvénient.

2.4. FORAGE EN CIRCULATION INVERSE

□ Principe :

Cette méthode de foration diffère des méthodes précédentes par une circulation du fluide (boue, eau ou air) dans l'espace annulaire (entre la formation et les tiges) avec remontée des cutting par l'intérieur du train de tiges. Il existe également des tiges à double parois qui assurent l'injection et la remontée du fluide par l'intermédiaire des seules tiges.

□ Avantages

- Information géologique plus précise et quasi instantanée. Les cutting recueillis en surface proviennent du seul fond du trou sans mélange avec des cutting provenant éventuellement de l'érosion du trou au cours de la remontée ;
- Information géologique continue. Avec les techniques de foration à circulation directe, la traversée de zones fissurées, fracturées ou caverneuses, se traduit assez souvent par des pertes partielles (ou totales) de fluide de circulation (air, eau, boue). A l'inverse, la remontée des cutting par le train de tiges diminue fortement les risques de pertes de fluide et de cutting ainsi que les éventuels colmatages ou contamination des aquifères traversés ;
- Meilleure individualisation des arrivées successives de fluide en cours de foration. Seul le niveau en cours de foration est testé au moment du passage de l'outil, les mélanges avec des niveaux supérieurs sont très réduits.

□ Inconvénients

- Présence d'un fluide de forage et de risque de colmatage (idem circulation directe).
- S'agissant d'une reconnaissance de niveaux producteurs au moment de sa foration, le suivi d'un chantier en circulation inverse nécessite un contrôle continu et des prises de décision adéquates pour caractériser les différents niveaux (arrêt de foration et circulation ou pompage dès observation particulière). Il existe un risque d'occulter des informations importantes sur un niveau producteur d'épaisseur réduite par passage trop rapide.

2.5. FORAGE CAROTTE

□ Principe

Cette méthode consiste en la réalisation d'un ouvrage à l'aide d'un outil spécial, le carottier, destiné à récupérer la formation en place sans destruction.

□ Avantages

- Observations géologiques de qualité optimale.
- Couplé à un dispositif d'orientation de la carotte, l'échantillon recueilli en zones fracturées permet une analyse des directions de fracturation.

□ Inconvénients

- Coût élevé ;
- Diamètre réduit ;
- Pourcentage de récupération des formations fonction de la nature des terrains (faible en structure non consolidée).

2.6. FORAGE PAR BATTAGE

□ Principe

La méthode consiste à soulever un outil lourd (trépan) et à le laisser retomber sur le terrain à traverser. La hauteur et la fréquence de chute varient selon la dureté des formations.

On distingue deux types de battages : le battage au treuil et le battage au câble. Cette dernière méthode est la plus courante. Le trépan est suspendu à un câble qui est alternativement tendu et relâché. Les mouvements sont rapides et le travail de l'outil se fait plus par un effet de martèlement dû à l'énergie cinétique que par un effet de poids comme pour le battage au treuil. Un émerillon permet au trépan de pivoter automatiquement sur lui-même à chaque coup. Le trou est nettoyé au fur et à mesure de l'avancement par descente d'une soupape permettant de remonter les débris (cutting). Ce procédé permet de réaliser des forages sans utilisation d'eau ou de boue.

□ Avantages

- C'est un procédé simple et relativement peu coûteux (investissement généralement plus faible que pour les autres procédés de foration) ;
- Il n'y a pas de fluide de forage (boues) et pas de risques de pollution de la nappe ;
- Le trépan peut être rechargé, reforgé et affûté sur le chantier ;
- C'est une méthode bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur ;
- Les résultats sont très bons dans les terrains fissurés (pas de pertes).

□ Inconvénients

- Vitesse d'avancement assez faible induisant un coût "suivi travaux" en proportion ;
- Méthode peu adaptée dans les terrains plastiques ou bouillants dans lesquels le tubage à l'avancement est nécessaire ;
- Difficultés pour équilibrer des venues d'eau artésiennes jaillissantes.
- Absence d'information sur les niveaux producteurs (qualité - production) sinon par mise en place de dispositif de pompage en parallèle à la foration.

2.7. FORAGE PAR HAVAGE

□ Principes

Le forage par havage est plus connu sous le nom de procédé Benoto : dans ce type de forage par curage ou havage, les tubages pénètrent dans la formation sous l'effet de leur propre poids ou sous l'action de vérins hydrauliques. Une benne preneuse "vide" progressivement l'intérieur du tubage tant que celui-ci se trouve au-dessus du niveau statique. Au dessous du niveau statique, l'emploi d'une soupape est recommandé.

En présence d'éléments grossiers ou de blocs, l'utilisation d'un trépan tombant en chute libre permet de briser l'obstacle. Il est également possible d'utiliser des vibreurs hydrauliques pour faciliter la descente ou l'arrachage des tubages.

□ Avantages

- Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles, notamment alluvionnaires (en l'absence d'éléments grossiers) ;
- Réalisation d'ouvrages en gros diamètre (peu répandus en eau minérale).

□ Inconvénients

- Méthode inadaptée aux terrains durs ;
- Frottement du tubage mis en place à l'avancement ; profondeur réduite
- Difficulté pour arracher les tubages de soutènement après la mise en place des crépines et du massif filtrant.

3. CHOIX D'UNE METHODE DE FORATION - LES PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE

Le mode de foration à retenir pour la réalisation d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres à prendre en compte au moment de la conception de l'ouvrage.

La spécificité du domaine des eaux minérales dans le choix de la méthode de foration réside dans le fait que l'objectif est de capter une ressource très définie en terme de qualité. Ceci oblige à choisir un mode de foration qui permet de bien isoler les horizons "parasites" en réalisant des cimentations adéquates. D'autre part, la foration ne devra pas altérer le niveau producteur que l'on souhaite capter (la foration à l'air sera généralement privilégiée).

3.1. NATURE GEOLOGIQUE DES TERRAINS TRAVERSES

Il convient d'apprécier la stabilité des formations concernées (roches meubles, roches dures), la présence de discontinuités (fractures, cavité).

- ⇒ Pour des terrains alluvionnaires peu stables, on choisira une méthode de foration à l'air avec tubage à l'avancement. Dans des cas particuliers, on pourra utiliser la foration rotary boue (moins recommandée).
- ⇒ Pour des terrains consolidés, on choisira une foration à l'air avec possibilité de tuber s'il existe des cavités par exemple.

3.2. PROFONDEUR FINALE DE L'OUVRAGE

Selon la profondeur objectif, il convient de réaliser des forations en diamètre suffisant pour permettre la mise en place d'éventuels tubages qui permettent de poursuivre le forage après soutènement des zones instables.

- ⇒ Les méthodes de battage et havage ainsi que celles avec tubage à l'avancement sont limitées en profondeur, elles pourront être utilisées pour faire les avant-trous ;
- ⇒ En terrain durs, pour des forages de grandes profondeurs, on travaillera au MFT ;
- ⇒ En terrain présentant des risques d'instabilité, et à fortes profondeurs, on peut être amené à choisir une foration rotary boue. Cependant, on ne privilégiera pas cette méthode compte tenu d'une part de la difficulté d'identifier les niveaux producteurs présentant la qualité d'eau requise (agrément) et d'autre part, des éventuelles interférences entre le fluide utilisé en foration (boues) et les eaux de l'aquifère.

3.3. NATURE DE L'OUVRAGE REALISE (RECONNAISSANCE OU EXPLOITATION)

En phase de reconnaissance, l'objectif prioritaire sera l'acquisition de données sur la géologie et les niveaux producteurs. On privilégiera dans ce cas les possibilités offertes quant à la qualité du suivi de la foration (foration à l'air).

Pour la réalisation d'un forage d'exploitation l'accent sera mis sur le captage d'un niveau producteur déterminé qu'il convient d'exploiter à un débit donné et de protéger de façon la plus efficace vis-à-vis de son environnement. Le diamètre de l'ouvrage sera défini en tenant compte des contraintes d'exploitation de l'ouvrage (diamètre des groupes de pompage, instrumentation). Le choix de la méthode de foration sera fait pour obtenir un trou parfaitement calibré dans lequel les tubages (crépines et pleins) pourront être positionnés au mieux avec mise en place optimum des graviers face aux crépines et/ou des cimentations derrière les tubages pleins de protection.

3.4. QUALITE DES FLUIDES DES RESERVOIRS.

Dans certains cas particuliers (artésianisme jaillissant, gaz sous pression), la qualité du fluide du réservoir peut induire des précautions spécifiques (contrôle des pressions par la boue, système anti-éruptifs type BOP).

La foration rotary à la boue pourra être privilégiée dans certains cas où le risque d'éruption est grand. Cette technique permet en effet, par augmentation de densité de la boue, de contenir les effets de pressions.

3.5. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER

Selon le lieu de réalisation de l'ouvrage (milieu urbain ou zone inhabitée) et la place disponible pour réaliser la plate-forme de forage, les matériels à utiliser pourront être sélectionnés selon leur encombrement, leur niveau sonore.

4. CONCLUSIONS

Les méthodes de forage sont diverses et doivent être adaptées au but poursuivi lors de la réalisation d'un ouvrage dans un gisement d'eau minérale.

Le forage constitue la méthode d'approche directe des caractéristiques d'un gisement que ce soit pour l'acquisition de données, où il s'agit alors de parfaire la connaissance d'un site ou que ce soit pour l'exploitation d'un niveau identifié, quand il s'agit de préciser des conditions de production.

Ainsi, si les techniques de forages à mettre en oeuvre doivent être étudiées au cas par cas, la conception d'un forage doit entrer dans la réflexion globale d'étude d'un gisement et le suivi de l'opération doit faire l'objet d'une méthodologie précise. Sous réserve d'une prise en compte de ces deux conditions, le forage apportera des informations utiles sur le gisement et l'opération pourra ainsi être valorisée.

BIBLIOGRAPHIE

- Pratique du forage d'eau - R. LAUGA - Edition Seesam (1990).
- Formulaire du foreur - Edition Technip (1978).
- Le forage d'eau - A. MABILLOT - Edition Johnson filtration System (1988).



Le suivi du forage d'eau minérale Approche méthodologique

Note technique n° 3

Novembre 1995

R E S U M E

Moyen direct d'approche des caractéristiques d'un gisement, le forage d'eau minérale a pour objet l'acquisition de données précises pour une meilleure connaissance globale d'un site et/ou une exploitation rationnelle d'une ressource identifiée.

Ainsi si la conception d'un forage doit entrer dans la logique de l'étude d'un gisement et si le choix de la méthode de foration doit être adaptée à chaque réalisation, le suivi de la phase foration est un des éléments essentiels d'un projet. Ce suivi doit permettre non seulement d'optimiser les investissements pour une meilleure connaissance du site mais encore d'orienter les décisions en cours de travaux pour répondre aux objectifs fixés en terme de quantité et principalement de qualité.

Le suivi du forage d'eau minérale fait appel une panoplie très complète de moyens (contrôles préliminaires, continus ou particuliers) dont la mise en oeuvre, qui dépend du contexte local, nécessite la présence d'opérateurs aptes à synthétiser des données dans un contexte global de gisement d'eau minérale et non de simple captage d'eau souterraine.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DU SUIVI DE FORAGE D'EAU MINERALE	1
3. CONTROLES PRELIMINAIRES	2
3.1. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER.....	2
3.2. CONDITIONS D'HYGIENES SPECIFIQUES	2
3.3. SECURITE DE CHANTIER.....	3
4. CONTROLES EN CONTINU	4
4.1. SUIVI GEOLOGIQUE	4
4.2. SUIVI DES PARAMETRES DE FORAGE	4
4.3. SUIVI HYDROGEOLOGIQUE.....	5
4.4. SUIVI HYDROCHIMIQUE	6
4.5. APPLICATIONS DES CONSIGNES PENDANT LA FORATION	6
5. CONTROLES PARTICULIERS.....	6
5.1 DIAGRAPHIES DIFFEREES.....	7
5.1.1. Principe et méthode.....	7
5.1.2. Types de diagraphe	7
5.2. LES POMPAGES D'ESSAIS.....	9
5.3. PRELEVEMENT POUR ANALYSE.....	10
5.4. CONTROLE DE RECEPTION.....	10
6. CONCLUSION.....	11
BIBLIOGRAPHIE.....	12

1. INTRODUCTION

Le forage est le seul moyen direct d'acquisition de données dans le cadre de l'étude d'un gisement. Il est à mettre en aval de moyens indirects comme une étude structurale du site, des études géophysiques... Ces dernières aident à définir une hypothèse de gisement, puis la meilleure implantation du forage dans le cadre de cette hypothèse. Les données acquises lors de la réalisation du forage ont pour objectif de confirmer ou non l'hypothèse de départ, la préciser, avant un équipement définitif d'exploitation.

Pour utiliser au maximum les informations, le suivi des opérations de sondage est essentiel :

pour valider la réalisation de l'ouvrage suivant les règles de l'art,
pour permettre d'adapter en cours de réalisation et le plus judicieusement possible le programme de test et de mesures sur l'ouvrage,
pour rentabiliser l'investissement forage et limiter la multiplication des ouvrages sur un site en optimisant l'acquisition de données et en valorisant leur interprétation.

Dans le cadre du présent rapport, seul le suivi d'ouvrage neuf sera abordé.

2. OBJECTIFS DU SUIVI DE FORAGE D'EAU MINERALE

Les objectifs principaux du suivi de forage sont :

- l'application du cahier des charges établi par le maître d'oeuvre et accepté par le ou les entreprises intervenant dans la réalisation de l'ouvrage pour un déroulement des travaux suivant les règles de l'art.

Ce cahier des charges pourra s'inspirer du fascicule n°76 des marchés publics de travaux intitulés : TRAVAUX DE FORAGE POUR LA RECHERCHE ET L'EXPLOITATION D'EAU POTABLE. Ce texte de base permet de fixer les règles de travail à l'entrepreneur qui dans le cas d'un forage d'eau minérale sont à appliquer strictement (hygiène, sécurité du chantier et de la ressource, nature des matériaux,...). Il ne doit pas seulement être considéré comme un devis avec énumérations des prestations.

- la compilation des informations par un personnel compétent sur la nature des fluides rencontré, leur débit, la nature des terrains traversés, les différentes phases de travaux (cimentation, développement).
- la réaction en temps réel aux aléas de chantier.

3. CONTROLES PRELIMINAIRES

3.1. ENVIRONNEMENT DU CHANTIER

Comme tout chantier, la réalisation d'un forage d'eau minérale doit répondre aux normes de sécurité en vigueur pour le personnel, mais aussi prendre en compte la sécurité de l'ouvrage et de la ressource.

Un périmètre de sécurité doit être clairement identifié pour limiter l'accès à des tiers, à des zones potentiellement dangereuses comme les bacs de stockage avant rejet ou à des zones sensibles comme la tête de puits.

Il faut prendre en compte l'écoulement des rejets d'eau de lavage, d'eau pompée après une acidification ou une désinfection, d'eau de pompage d'essai. Ces eaux devront être traitées si nécessaire pour respecter les normes de rejet en vigueur. Elles devront pouvoir s'écouler dans le milieu environnant sans nuisance.

Les chantiers de forage d'eau minérale sont souvent implantés en milieu urbain, en particulier pour ceux des stations thermales. Il est nécessaire de porter une grande attention aux mesures prises pour limiter les nuisances aux riverains surtout concernant le bruit.

La réalisation d'un forage d'eau minérale peut se faire sur un site en cours d'exploitation. Mais dans ce cas, une surveillance très précise de tous les ouvrages de production environnants, sera mise en oeuvre. L'exploitation du site pourra être stoppée si nécessaire. La réalisation des forages en station thermale par exemple se fera de préférence durant la période de fermeture annuelle de la station, et bien avant la date de réouverture.

3.2. CONDITIONS D'HYGIENES SPECIFIQUES

Plus encore que pour la réalisation de forage de production d'eau potable des conditions d'hygiènes spécifiques doivent être prise dès la conception du cahier des charges et jusqu'à l'achèvement des travaux :

- l'atelier de sondage mis en oeuvre par l'entreprise doit correspondre à celui décrit dans le cahier des charges (puissance nécessaire, approvisionnement suffisant) et doit présenter un état irréprochable et présenter (pour limiter les risques de pollution) :
 - . une absence de fuite sur les circuits hydrauliques, sur les circuits d'alimentation,
 - . un graissage limité au strict minimum,
 - . une aire de travail dégagée,
 - . un stockage approprié : les crépines, les tubes, les tiges de forages, les graviers, seront protégées et ne seront pas stockés à même le sol,
- la nature des matériaux et matériels employés pour les équipements de l'ouvrage devront être reconnus de qualité alimentaire et ne devront pas présenter d'interférence organoleptiques avec l'eau minérale.

Des certificats sur l'origine et la qualité des matériaux employés sont à fournir par l'entreprise (des échantillons des différents matériaux pourront être demandés.)

- les éléments introduits dans le forage devront faire l'objet d'un nettoyage et d'une désinfection systématique suivant une procédure préétablie.

Il peut s'agir aussi bien d'équipement définitif comme la colonne de production, le massif de gravier, la pompe ... que d'équipement provisoire comme les sondes de diagraphie, la sonde de niveau manuelle.

Un des points les plus important pour maintenir la qualité de l'ensemble est la sensibilisation du personnel à ces mesures d'hygiène et de sécurité, ce qui n'est généralement pas systématique dans les équipes de forage d'eau habituées à travailler sans contrainte spécifique.

3.3. SECURITE DE CHANTIER

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux minérales peuvent être très différentes de celle présentées par les forages d'adduction d'eau potable (AEP). Certains paramètres thermodynamiques sont parfois à prendre en compte dont :

- température qui peut être élevée,
- présence de gaz principalement du dioxyde de carbone, de l'azote ou de l'hydrogène sulfuré. A la présence de gaz, peut être associée la production de fluide par gas lift naturel,
- pression en tête d'ouvrage qui peut être importante. Les aquifères concernées sont souvent profonds et captifs avec parfois un débit artésien jaillissant.

Toutes ces anomalies ne sont pas obligatoirement présentes simultanément sur un même ouvrage. Elles doivent cependant être prise en compte dès la rédaction du cahier des charges et, en fonction de la connaissance préalable du site et de l'aquifère, des mesures adaptées au(x) risque(s) peuvent être prise :

- Pour la présence de gaz, la fiche des caractéristiques des gaz susceptibles d'être rencontrés, doit être présente sur site et connue du personnel. Des détecteurs de gaz portatifs, principalement taux d'oxygène et sulfure d'hydrogène doivent être présent sur chantier avec déclenchement d'alarme au seuil critique.
- Pour prévenir des éruptions et des artésianismes importants, un système de type BOP (blow out preventer) peut être installé sur le tubage de tête et permettre de contrôler l'ouvrage en cas d'urgence.
- Pour les eaux chaudes, les projections de fluide seront limitées. Le personnel sera équipé de vêtement de protection approprié.

Comme pour les conditions d'hygiène spécifique, ces notions de sécurité très particulières ne peuvent être correctement mise en oeuvre que par une formation et sensibilisation du personnel au préalable.

Un manque de contrôle en cas d'urgence est souvent la cause de malfaçon ou de pollution.

4. CONTROLES EN CONTINU

4.1. SUIVI GEOLOGIQUE (Fig. 1 - page 4 bis)

Il consiste en une prise d'échantillon des terrains traversés (cutting) pour les forages destructifs. Ils seront prélevés en quantité suffisante, conditionnés et repérés pour permettre une utilisation aisée même après la fin du chantier.

Le rythme des prises d'échantillon est à définir en début de chantier. Il dépend de la profondeur de l'ouvrage, de l'intérêt des terrains traversés. Il pourra être d'un échantillon tous les 3 mètres dans les morts terrains et d'un échantillon par mètre dans le ou les réservoirs traversés.

La qualité de ces informations dépend beaucoup de la méthode de foration choisie. Une méthode de foration inadaptée ou mal employée ne permettra pas d'établir une coupe géologique de sondage correcte. Par exemple, un forage en gros diamètre réalisé au rotary nécessitera un débit de pompe à boue important pour assurer une évacuation correcte des sédiments les plus grossiers faute de quoi d'une part la coupe géologique risque d'être parcellaire et d'autre part les sédiments non évacués risquent de bloquer l'outil.

Pour les forages profonds, il faut prendre en compte les temps de remontée des cutting qui n'est alors plus négligeable, pour caler la profondeur des coupes.

Les cutting pourront servir, dans le cas d'un site vierge, pour une analyse minéralogique d'identification. Ils permettront d'aider à définir les cotes de la coupe technique. Ceux issus du réservoir permettront après une analyse granulométrique de dimensionner l'ouverture des crépines et d'un éventuel massif filtrant. Ceci montre l'importance de cette simple opération de collecte pour l'optimisation et la pérennité de l'ouvrage.

Sur certains sites totalement vierges de toute reconnaissance, il peut être nécessaire de mettre en oeuvre des sondages carottés au cours d'un forage. La présence d'un géologue de sonde est nécessaire en continu pour préciser la longueur des carottes.

4.2. SUIVI DES PARAMETRES DE FORAGE (Fig. - page 4bis)

Ce procédé encore appelé diagraphie instantanée permet d'avoir en temps réel, un enregistrement graphique en fonction de la profondeur des paramètres suivant :

- vitesse instantanée d'avancement,
- pression sur l'outil,
- pression du fluide d'injection,
- couple de rotation,
- débit d'air,
- percussion réfléchie,
- vitesse de rotation...

Le suivi de tel ou tel paramètre est à définir au préalable en fonction de la méthode de foration retenue. Le suivi de la percussion réfléchie n'a pas lieu d'être sur un forage au rotary.

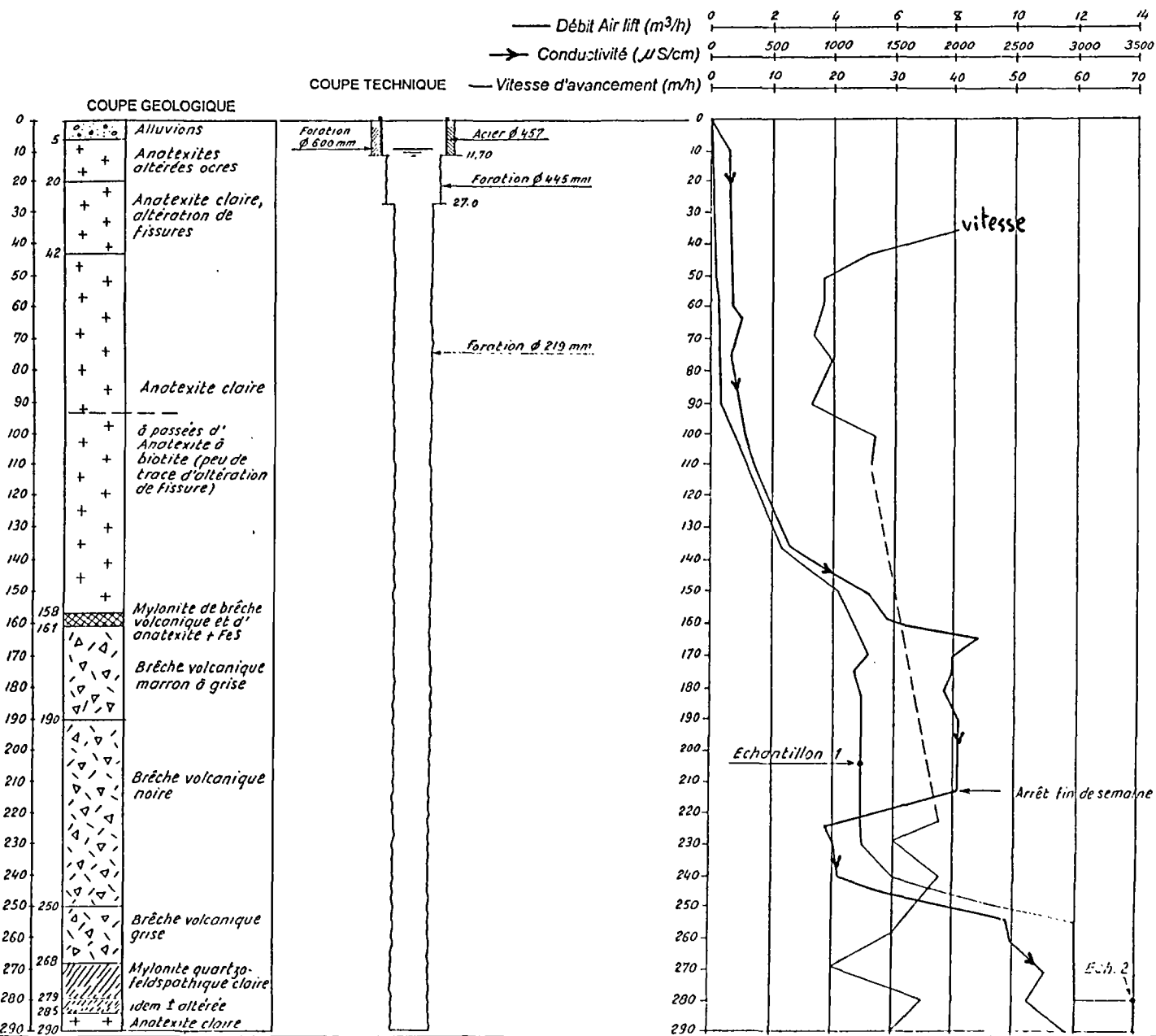


Fig. 1 : Exemple de suivi des paramètres en foration

Ces mesures qui représentent un surcoût parfois notable peuvent se justifier pour des forages à haute valeur ajoutée comme le sont les forages d'eau minérale. Elles permettent :

- de mieux définir en temps réel la coupe géologique de sonde. Il s'agit principalement de critères physiques tels la dureté ou l'homogénéité des terrains,
- de recalculer en profondeur la coupe cutting,
- d'apprécier la qualité du travail de l'entreprise de forage en visualisant des paramètres tels que les pressions sur l'outil, la vitesse d'avancement...
- d'avoir des informations même en cas de problème sur un forage.

Un forage peut s'effondrer pour des raisons diverses. Les diagraphies instantanées et les cuttings représenteront alors les seules données exploitables.

Ces mesures pour être bien interprétées doivent être suivies par une personne compétente. Deux méthodes de foration différentes ne réagissent pas forcément de la même façon sur un même terrain.

Par ailleurs, la technique de forage sélectionnée influe beaucoup sur l'intérêt et les paramètres de ce suivi.

4.3. SUIVI HYDROGEOLOGIQUE

Celui-ci ne peut correctement s'effectuer que si la foration est réalisée à l'air ou ce qui est plus rare pour les forages d'eau minérale, si ce forage est réalisé par battage ou par havage.

Dans le cadre d'un forage à l'air, les venues d'eau se traduisent par une sorte de geyser plus ou moins important en surface. Pour individualiser et caractériser les différentes venues d'eau, ce qui est capital pour un forage d'eau minérale où l'on recherche un type d'eau bien précis, il est parfois souhaitable que le forage soit réalisé avec un tubage à l'avancement.

Le suivi hydrogéologique consiste alors à :

repérer la cote des venues d'eau,
évaluer le débit en surface qui n'est qu'un débit de soufflage,
noter la qualité du réservoir (fissuration ou autre).

Dans le cas d'un forage à la boue ou à l'eau en plus des problèmes de contaminations du réservoir par des fluides exogènes, les seuls contrôles possibles sont la variation de niveau du "bac à boue" et les variations de viscosité du fluide d'injection. Ces informations sont nettement insuffisantes pour un forage de reconnaissance d'eau minérale à moins de mettre en oeuvre de véritables pompes intermédiaires après sortie du train de tige.

La mesure systématique du niveau d'eau avant et après la journée de travail est une donnée intéressante à collecter et à exploiter ultérieurement. Le suivi hydrogéologique sera plus conséquent lors du test de pompe.

4.4. SUIVI HYDROCHIMIQUE

Il commence dès la conception de l'ouvrage. En fonction de la qualité de l'eau recherchée (carbogazeuse ou non, chaude ou non ...), il permettra de sélectionner au mieux les matériaux (équipement de forage) et la méthode de foration ainsi que les postes à surveiller durant les travaux.

Au cours d'un forage, il faudra échantillonner le fluide de chaque venue d'eau en préservant au maximum ses propriétés initiales. D'où l'importance des mesures réalisées in situ (température, conductivité, présence de gaz, nature des gaz) et des échantillonnages réalisés en suivant des procédures bien précises (filtration, acidification pour les cations, conditionnement...).

Dans le cadre d'un forage d'eau minérale, la traversée des réservoirs avec une méthode de foration utilisant un fluide autre que l'air est à éviter autant que possible. Durant la foration, les perturbations induites par l'air sur certains paramètres ne sont déjà pas négligeables : c'est le cas pour la teneur en oxygène dissous, la teneur en gaz, la teneur en fer dissous...

Même si ces informations restent partielles, elles sont importantes car acquises en temps réel, elles seront complétées par les diagraphies différées de qualité des eaux, l'hydrochimie réalisée sur les tests de pompage et les éventuels prélèvements de fond.

Les paramètres les plus souvent mesurés au cours de la foration sont la conductivité, la température, la teneur en gaz, la teneur en fer total, manganèse total, les éléments majeurs...

4.5. APPLICATIONS DES CONSIGNES PENDANT LA FORATION

La société chargée d'assurer le suivi de la réalisation de l'ouvrage a la responsabilité au jour le jour :

- ❖ de la mise en oeuvre des consignes de sécurité classique sur un chantier mais aussi et surtout dans le cadre d'un forage d'eau minérale de la mise oeuvre des consignes d'hygiène, d'environnement, de sécurité spécifique définie au paragraphe 3,
- ❖ de l'approvisionnement en matériel et de la conformité tant en quantité qu'en qualité des matériaux et matériels mis en place avec fourniture de certificat d'origine,
- ❖ de la tenue du cahier de chantier par l'entreprise de forage où tout événement doit être consigné.

La vie de l'ouvrage commence dès sa foration.

5. CONTROLES PARTICULIERS

Des opérations spécifiques et ponctuelles doivent être mises en place en cours ou en fin de foration comme par exemple pour le contrôle de la cimentation, la caractérisation du ou des fluides (s), la définition de la colonne de captage, des essais de débit.

Ces opérations mettent en oeuvre des techniques particulières qui vont être développées ci-dessous.

5.1 DIAGRAPHIES DIFFERÉES

5.1.1. Principe et méthode

Les diagraphies permettent de fournir un enregistrement continu des variations d'un paramètre physique ou chimique en fonction de la profondeur. Ces opérations contrairement aux diagraphies instantanées sont enregistrées lors d'une interruption temporaire ou définitive de la foration d'où le nom de diagraphies différées.

Les paramètres désirés sont mesurés à l'aide de sondes qui sont descendues à l'extrémité d'un câble relié au système d'acquisition de données en surface. En fonction des outils utilisés, certains paramètres de mesure sont à surveiller pour obtenir un résultat de qualité comme :

la vitesse de remontée des sondes,
la calibration de certaines sondes,
la préparation de l'ouvrage. Certaines mesures ne peuvent s'effectuer qu'en trou tubé, d'autres en trou ouvert, d'autre encore avec un fluide dans le forage. Ces impératifs sont à intégrer dans le programme d'intervention défini en début de travaux.

Les sondes mesurent des paramètres variables de type : électriques, nucléaires, soniques, débitmétrique, géométriques (déviation, diamètre...), hydrochimiques et vidéo.

Il existe dans les sociétés de service des combinaisons d'outil monté sur un même train de sonde.

Les informations obtenues après interprétation sont de plusieurs ordres : lithologiques, qualité du ou des réservoir(s), qualité des fluides, productivité de l'ouvrage, qualité de réalisation du forage.

Les diagraphies sont largement utilisées dans le domaine de la prospection minière et pétrolière, mais sont moins développées dans le domaine de l'eau essentiellement pour des raisons financières. En ce qui concerne l'eau minérale, les informations qu'elles peuvent apporter sur la qualité des réservoirs (corrélation possible sur un même site), la qualité des différents fluides rencontrés dans le forage, la qualité de réalisation de l'ouvrage justifient pleinement leur emploi.

5.1.2. Types de diagraphie

Avertissement :

- le nom d'un même outil peut différer suivant les compagnies de service.
Exemple : le dual latterolog est appelé DL chez Dresser Atlas et DLL à Schlumberger.
- Pour un type de mesure donné, il peut exister plusieurs outils plus ou moins sophistiqués sur le marché avec des noms différents.
Exemple : il existe chez Dresser Atlas le Gamma Ray : GR, GRS et PFC.

→ Les noms cités dans le paragraphe suivant sont issus du catalogue d'outils de la société ROBERTSON GEOLOGGIG.

❖ **Diagraphies physico-chimiques** (Fig. 2 - page 8 bis) : ce sont celles qui présentent la plus grande spécificité pour un forage d'eau minérale. Les paramètres le plus souvent mesurés sont la conductivité et la température du fluide mais aussi le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, l'oxygène dissous, ainsi que n'importe quel élément chimique mesuré par électrode spécifique (iodure, fluorure...).

Ces jeux de diagraphie permettent de localiser, d'identifier et de quantifier les évolutions physico chimiques dues à des venues d'eau, à des phénomènes globaux sur la colonne d'eau (dégazage, précipitation de carbonate), ou à des réactions plus locales (corrosion). Ce type de diagraphie peuvent être réalisés et comparés sur un forage statique (puits au repos) et en dynamique (puits en production).

Une inspection vidéo classique peut apporter des informations indirectes dans ce domaine comme la détermination de la zone de dégazage.

❖ **Diagraphie de production** (Fig. 2 - page 8 bis) : cet outil appelé micromoulinet (Flow-meter) permet de mesurer les vitesses de courants verticaux dans les forages. Associé à un diamètreur (mesure du diamètre réel de l'ouvrage), il permet pour un débit d'exhaure donné de repérer et de quantifier les zones productrices.

❖ **Diagraphie de contrôle de qualité de la réalisation de l'ouvrage** : il s'agit

- d'un contrôle de la qualité de la cimentation par un outil acoustique (Ciment Bond Log CBL),
- d'un contrôle visuel par inspection vidéo de la qualité de la mise en place de la colonne de captage. Cette première inspection vidéo constituera l'état initial du forage et pourra servir de référence dans le cadre de contrôles du vieillissement de l'ouvrage,
- d'un contrôle de la déviation à posteriori de l'ouvrage par rapport à la prescription initiale qui est le plus souvent la verticale par un outil qui peut faire des mesures de direction et d'inclinaison même en tube acier comme le Gyroscopic Verticality Probe. Il existe d'autres outils moins sophistiqués comme le Verticality Probe ou plus sophistiqués comme le DIPMETER. Une déviation importante pourrait poser des problèmes lors de la mise en place de la colonne d'exhaure,
- d'un contrôle des diamètres de l'ouvrage par un outil muni de patins (caliper).

❖ **Diagraphies lithologiques** : Elles permettent de compléter et de recalibrer en profondeur une coupe géologique de sonde, d'aider à positionner les crépines. Le choix des outils adaptés, varient en fonction du contexte géologique. Le choix pourra être différent selon que l'on traverse des terrains sédimentaires détritiques, des séries sédimentaires carbonatées ou des terrains cristallins.

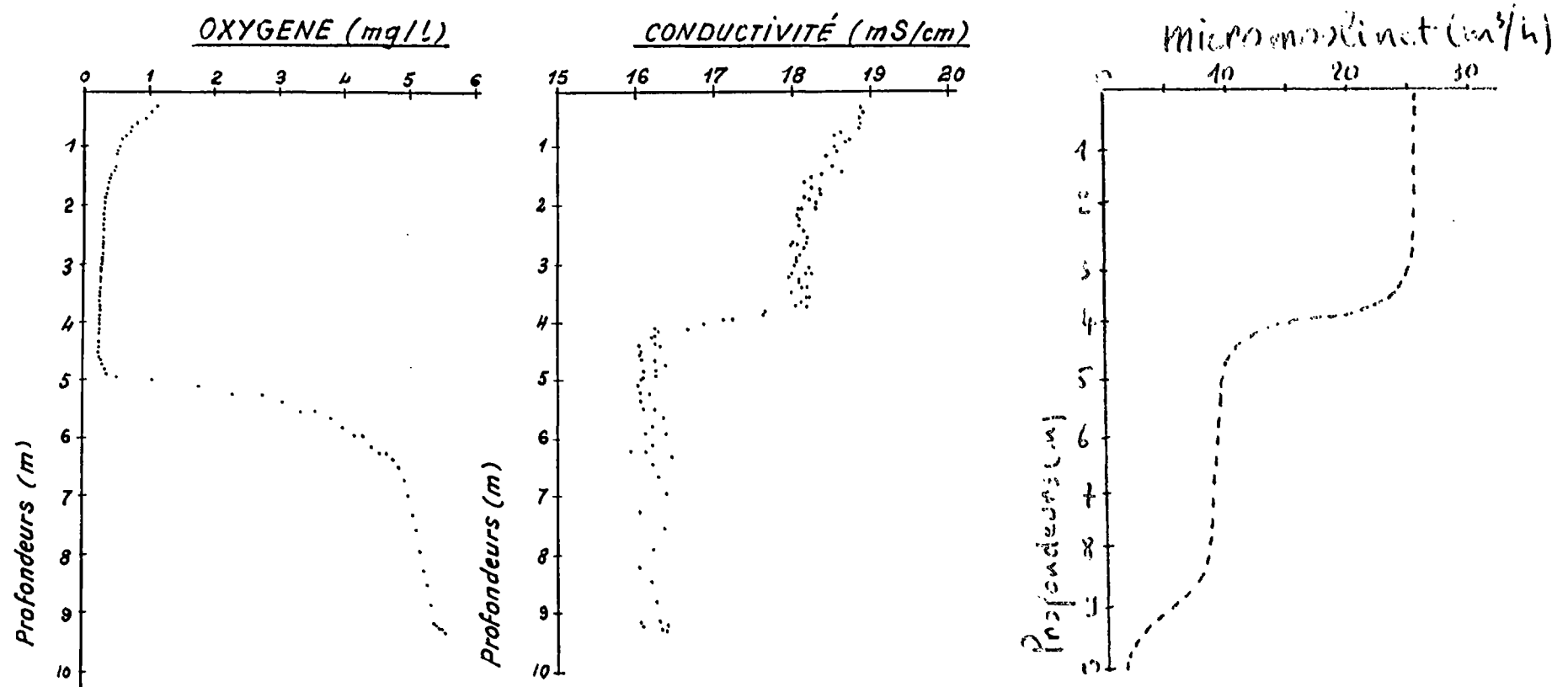


Fig. 2 : Exemple de mesures par diagraphies différées (micromoulinet - physico-chimie)

L'outil de base est une diagraphie nucléaire le Gamma Ray (GR) :

- qui est utilisable pratiquement dans toutes les conditions,
- qui permet des corrélations lithologiques,
- qui est peu perturbé par la géométrie de l'ouvrage.

On pourra utilisé aussi par exemple :

des outils accoustiques plus spécifiquement dans les terrains durs avec une porosité de fissure ou de fracture comme le Compensated Sonic Log ou l'Accoustic Televiwer (BHTV),

des outils nucléaires qui permettent d'apprécier la densité des terrains traversés comme le Gamma-Gamma ou qui permettent d'évaluer la porosité des terrains comme le Neutron-Neutron,

des outils électriques comme l'outil classique appelé polarisation spontanée (PS) ou d'autres comme la petite normale (16" Normale) et grande normale (64" Normal) qui permettent d'évaluer la résistivité des terrains traversés pour une profondeur d'investigation donnée propre à chaque outil

✧ **Diagraphies de réservoir** : Elles permettent de préciser l'étendue du réservoir, sa qualité (porosité, densité, individualisation des fractures productrice en milieu cristallin...). Elles sont de type nucléaire, électrique ou sonique.

On utilisera des outils spécifiques, tout comme les diagraphies lithologiques avec par exemple :

pour apprécier la porosité : des outils nucléaires comme le Neutron-Neutron,
pour apprécier la fracturation : des outils accoustiques comme le BHTV, le compensated Sonic, des outils nucléaires comme le Neutron-Neutron, la caméra vidéo,
pour apprécier les zones perméables, la résistivité du fluide de formation, la résistivité de la formation des outils électriques comme la petite normale et la grande normale.

5.2. LES POMPAGES D'ESSAIS

Ces tests interviennent en phase finale de la réalisation d'un ouvrage. Les différentes venues d'eau ont été caractérisées au cours de la foration. Les diagraphies physico chimiques et éventuellement le micromoulinet ont permis de confirmer ou d'infirmer les premières hypothèses. La décision d'équiper le forage a été prise. Le développement est achevé.

L'eau d'exhaure proviendra suivant les cas de fissures d'un réservoir unique ou plus généralement d'un mélange de venues d'eau proches de la qualité recherchée. Le test de pompage a pour but de déterminer le débit d'exhaure optimal assurant une qualité physico chimique constante et un niveau dynamique stabilisé (pérennité de la ressource).

Pour cela, deux types de test sont mis en oeuvre :

- un pompage court (inférieur à 24 h) qui se rapproche d'un pompage par paliers de débit croissant ayant pour objet d'approcher de débit optimal d'exhaure.

- un pompage de longue durée qui sera utilisé comme pompage de qualification permettant de valider pour le débit déterminé, une qualité physico chimique et bactériologique constante et une stabilisation du niveau dynamique.

Pour contrôler tous ces paramètres, un suivi en continu des niveaux d'eau, du débit, de la conductivité, de la température sera mis en place.

Suivant une procédure préétablie, des prélèvements seront effectués pour analyse physico chimique, bactériologique, gaz, gaz/liquide ratio dans le cas d'une eau gazeuse, radioactivité, isotopes.

Les différentes émergences naturelles ou non de la ressource feront également partie de ce suivi.

5.3. PRELEVEMENT POUR ANALYSE

Qu'il s'agisse de prélèvement d'eau, ou de gaz, des procédures strictes de prélèvements sont à mettre en oeuvre pour éviter l'évolution non contrôlée de la qualité des échantillons entre l'ouvrage et le laboratoire. Dans ce cadre, un certain nombre de mesures physico chimiques doivent être réalisées sur site :

il s'agit principalement pour l'eau :

- de la température, de la conductivité, du pH, du potentiel d'oxydo-réduction, de la teneur en oxygène dissous, de la présence de gaz libre, de l'alcalinité, de la teneur en fer, manganèse dissous et sulfure.

pour le gaz :

- de la teneur en H_2S (qui s'oxyde très rapidement),
- le gaz/liquide ratio.

Si les normes d'analyse au niveau des laboratoires sont clairement définies, il n'en est pas de même pour le prélèvement et le conditionnement du fluide ou du gaz. Dans le cadre d'un forage d'eau minérale, ces opérations d'échantillonnage et de conditionnement doivent faire l'objet d'une procédure qualité.

5.4. CONTROLE DE RECEPTION

(cf. note concernant le guide méthodologique d'équipement d'exploitation de forage d'eau minérale).

6. CONCLUSION

Toute réalisation de forage, ouvrage complexe ayant une incidence sur le sous-sol et l'environnement, doit faire l'objet de spécifications préalables et d'un suivi au cours de travaux. C'est généralement le cas pour les eaux minérales, bien qu'il se trouve toujours des opérations réalisées (improvisées ?) directement par des entreprises de forage sans programmation précise.

Outre l'objectif de production d'eau de qualité, un forage représente une ouverture sur une ressource d'eau minérale et sa réalisation peut constituer une nuisance, parfois irréversible pour un gisement.

Ainsi le cahier des charges de conception et de suivi de forage ainsi que la mise en oeuvre de techniques appropriées (tant de réalisation que de suivi) sont les garants de la réussite de ces ouvrages qui s'intègrent en outre dans un contexte évolutif de projet par le fait qu'il convient en permanence d'adapter le mode de réalisation en fonction des données acquises en cours de projet, d'où l'importance de ce suivi.

BIBLIOGRAPHIE

- Notes internes ANTEA
- Support de cours ANTEA : les techniques du forage d'eau (1994) - E. BERTHET
- Le forage d'eau (1993)- Michel DETAY - Ed Masson
- La pratique du forage d'eau (1990) - Robert LAUGAT - Ed Seesam
- Diagraphies appliquées à l'hydrogéologie (1987) - Dominique CHAPELLIER - Ed Lavoisier TEC/DOC
- Hydrochimie en forage - Approche méthodologique (1995) - Alain GADALIA / Jean Luc HONEGGER - Journal Hydrogéologie BRGM.95
- WIRELINE LOGGING TOOL Catalog Editions technip.



Equipement de forage d'exploitation d'eau minérale

Approche méthodologique

Note technique n° 4

Novembre 1995

R E S U M E

L'équipement de forage d'exploitation d'eau minérale constitue la dernière étape avant la mise en production de la ressource d'un gisement. Cette étape est aussi essentielle que celle qui a permis d'identifier le niveau aquifère à capter puisqu'il s'agit de garantir la qualité de l'eau minérale exploitée au cours du temps.

Ainsi les modalités d'équipement d'un forage et le choix des matériaux doivent-ils être abordés de manière critique vis à vis des particularités de l'eau minérale (caractéristiques physico-chimiques) ainsi que de l'environnement particulier du niveau aquifère identifié (interférence) de manière à assurer une exploitation conforme aux autorisations réglementaires.

La mise en place de l'équipement d'un forage d'exploitation d'eau minérale exige, tout comme la réalisation du forage en tant que tel et son suivi de réalisation, une attention particulière pour un strict respect des règles de l'art dans un souci permanent de QUALITE.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	1
2. EQUIPEMENT DU FORAGE	1
2.1 TUBAGE PLEIN	1
2.1.1. Objectif.....	1
2.1.2. Types de tubage. Assemblage	2
2.1.3. Choix des matériaux	2
2.1.4. Précaution à prendre dans le cadre d'un forage d'eau minérale	3
2.1.5. Contrôle au moment de la pose.....	3
2.1.6. Contrôle à posteriori.....	3
2.2. CREPINE	3
2.2.1. Objectif.....	3
2.2.2. Types de crépines	4
2.2.3. Méthode de mise en place.....	4
2.2.4. Choix du matériau.....	4
2.2.5. Précaution spécifique à prendre dans le cadre d'un forage d'eau minérale.....	4
2.2.6. Contrôle au moment de la mise en place.....	5
2.2.7. Contrôle à posteriori.....	5
3. MASSIF FILTRANT	5
3.1. OBJECTIF ET PRINCIPE	5
3.2. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU MASSIF FILTRANT	5
3.3. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE.....	6
3.4. CONTROLE AU MOMENT DE LA MISE EN PLACE.....	6
3.5. CONTROLE A POSTERIORI.....	6
4. CIMENTATION	7
4.1. OBJECTIFS.....	7
4.2. METHODE DE REALISATION	7
4.3. CHOIX DU CIMENT.....	8
4.4. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE.....	8
4.5. CONTROLE AU MOMENT DE LA REALISATION.....	8
4.6. CONTROLE A POSTERIORI.....	8

5. DEVELOPPEMENT D'OUVRAGE	9
5.1. OBJECTIF	9
5.2. TYPE DE DEVELOPPEMENT	9
5.3. CHOIX DE LA METHODE DE DEVELOPPEMENT	9
5.4. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE.....	10
5.5. CONTROLE AU MOMENT DE LA REALISATION	10
5.6. CONTROLE A POSTERIORI.....	10
6. NETTOYAGE ET DESINFECTION	10
6.1. PRODUIT MIS EN OEUVRE	10
6.2. PRECAUTION D'EMPLOI.....	11
6.3. CONTROLE AVANT ET APRES L'EMPLOI DU PRODUIT.....	11
7. CONTROLES DE RECEPTION - DOSSIER DES OUVRAGES EXECUTES	11
8. EQUIPEMENT D'EXHAURE DANS LE FORAGE	12
9. CONCLUSION	12
BIBLIOGRAPHIE	13

1. INTRODUCTION

Le forage d'exploitation d'eau minérale a pour objet de délivrer en surface une qualité et un débit d'eau donné en préservant cette qualité depuis le gisement jusqu'à la tête de forage.

Comme il a été précisé dans l'approche méthodologique consacrée au suivi de forage, les consignes de sécurité et d'hygiène spécifique au forage d'eau minérale ne s'arrêtent pas à la fin de la foration, mais sont à mettre en oeuvre jusqu'à la livraison de l'ouvrage définitif.

Les nombreuses informations accumulées lors du suivi de foration, sur la nature du fluide, la nature du réservoir, la nature de l'encaissant vont permettre d'optimiser la colonne de captage prévue initialement dans le cahier des charges.

L'équipement définitif de forage d'exploitation d'eau minérale, dernière pièce d'une démarche complexe représente un élément essentiel de la chaîne de qualité.

Non seulement les équipements spécifiés et mis en oeuvre doivent répondre aux contraintes liées aux caractéristiques de la ressource, du forage réalisé et aux objectifs de production, mais encore ils doivent garantir une longévité à cet ouvrage.

Ces différents équipements sont sommairement décrits en mettant l'accent sur les spécificités liées aux eaux minérales.

2. EQUIPEMENT DU FORAGE

2.1 TUBAGE PLEIN

2.1.1. Objectif

Il a pour fonction :

- ♦ de canaliser l'eau depuis le gisement jusqu'en surface et de l'isoler de son contexte hydrogéologique,
- ♦ de tenir mécaniquement les terrains traversés,
- ♦ de participer à l'individualisation de l'eau captée du reste du forage ou de la surface,
- ♦ de permettre la fixation du matériel de tête d'ouvrage (supportage de pompe immergée, raccordement au réseau de surface).

Le diamètre du tubage ou des différents tubages sera lié à la profondeur finale, à la qualité des terrains traversés et au débit de production espéré.

Les tubages peuvent être provisoires (recouverts par l'équipement définitif) ou définitifs (servant de canalisation), et dans ce cas un diamètre uniforme sur le forage sera préféré.

2.1.2. Types de tubage. Assemblage

Outre les matériaux (§ 2.1.3.), les tubages se caractérisent par leur diamètre, leur épaisseur, leur méthode de fabrication pour les tubages métalliques (tubes étirés ou soudés) et leurs techniques d'assemblage qui peut s'effectuer par filetage, soudage, bride ou différents raccords particuliers.

La sélection de ces assemblages doit permettre de limiter toute zone de rétention de fluide et de turbulence. Toute multiplication de matériaux différents (joints, soudures) est à éviter.

2.1.3. Choix des matériaux

La plupart des matériaux destinés à l'eau potable peuvent être utilisés. Cependant au cas par cas, il est essentiel de les spécifier en prenant en compte tous les paramètres :

- physico-chimiques des fluides rencontrés. Il faut prendre en compte les eaux minérales, mais aussi les autres productions potentielles, les fluides de forage, et surtout les produits utilisés pour les nettoyages et stérilisation après forage et exploitation.
- mécaniques liées aux contraintes de terrain et des fluides statiques ou dynamiques, mais aussi aux interventions techniques dans les ouvrages (descente d'outil, de matériel, de pompe, de brosse mécanique ...).
- d'états de surface, qui est un facteur de développement/accrochage de biofilm et un catalyseur de dépôt.
- Organoleptiques, que ce soit sur les matériaux neufs mais aussi au cours de leur vieillissement.

Aussi tous les matériaux comme les aciers inoxydables, PVC, acier avec revêtement ou les composites peuvent être envisagés, mais présentent tous des contre indications parmi lesquelles:

- ⇒ sensibilité aux rayures, chlorures, sulfures, hydrogène et tensions pour certains aciers inoxydables,
- ⇒ sensibilité aux chocs, à la température et aux chlorures pour les PVC,
- ⇒ effets catastrophiques de rupture (par choc ou rayure) des couches superficielles de composite ou d'acier revêtu.

L'expérience du personnel de chantier doit être vérifiée au regard des matériaux à mettre en place. Par ailleurs, des contraintes ultérieures d'utilisation de l'ouvrage doivent être précisées en fonction de ces matériaux.

En ce qui concerne les aciers inoxydables, qui sont une grande famille de matériaux, les choix dans certains cas (en particulier présence de chlorure et température) ne doivent pas exclusivement porter sur les références 304L et 316L.

2.1.4. Précaution à prendre dans le cadre d'un forage d'eau minérale

Plus que pour tout forage d'eau, il faut s'assurer que la qualité physico-chimique du fluide qui sera en contact avec le tubage ne réagisse pas avec la nature du matériau qui constitue le tube et inversement. Ceci passe par une bonne connaissance :

- de la qualité physico-chimique du fluide qui va être capté
- des caractéristiques des matériaux de tubage.

2.1.5. Contrôle au moment de la pose

Il y a lieu de vérifier :

- que le matériel corresponde aux spécifications demandées,
- que le matériel soit nettoyé et désinfecté avant d'être mis en place,
- que les cotes prévues de mise en place soient respectées, et en particulier que les superpositions de tubage dans les télescopes soient suffisantes,
- que l'assemblage par vissage, soudage ou autre, soit fait dans les règles de l'art,
- que le tubage ne soit pas endommagé lors de sa mise en place (frottements limités lors de la descente).
- que l'utilisation de graissage de type alimentaire soit limité au strict nécessaire.

Par ailleurs, la qualité de mise en oeuvre, en particulier des assemblages est un facteur essentiel de réussite.

2.1.6. Contrôle à posteriori

Une inspection vidéo permettra de visualiser la mise en place correcte du tubage suivant les spécifications, l'état général de ce dernier et l'étanchéité apparente des raccords soudés ou filetés

2.2. CREPINE

2.2.1. Objectif

Schématiquement la crépine est un tube ajouré laissant le passage à l'eau tout en maintenant la formation. En tant qu'interface avec la ressource, elle constitue l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation. Sa longueur, son type, sa nature sont directement fonction de l'épaisseur de la formation à capter, du niveau de rabattement maximal, de la nature de l'aquifère.

Elle devra répondre aux critères suivant :

- permettre la production de fluide sans particule fine,
- rester inerte vis à vis du fluide à capter (interaction de matériaux mais aussi turbulence),
- résister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation,
- ne pas risquer un vieillissement prématuré,
- induire des pertes de charges minimales.

2.2.2. Types de crépines

Une crépine se caractérise :

- par la nature du matériau qui la constitue,
- par la forme des ouvertures,
- par la taille des ouvertures,
- par le coefficient d'ouverture.

Les caractéristiques géométriques (taille, densité et forme des ouvertures) dépendent de la nature et des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère définies lors du suivi de forage (analyse granulométrique, diagraphie, ...).

Dans certains types de terrain très consolidés comme des carbonates ou des terrains cristallins, la présence de crépine n'est pas forcément utile, elle peut induire une augmentation des pertes de charges quadratiques (liées à l'ouvrage).

Lors de la réalisation de forages d'eau minérale les deux types de crépines le plus fréquemment utilisés sont (Fig. 1 - page 4 bis) :

- ⇒ les crépines perforées (à trous oblongues, à nervures repoussées, ou à fentes rectangulaires pour le PVC). Le coefficient d'ouverture est limité de 10 à 20 %,
- ⇒ les crépines à fente continue sur toute la longueur de la crépine, obtenue par enroulement hélicoïdal d'un "fil enveloppe profilée" soudé sur des génératrices métalliques verticales. Le coefficient d'ouverture est nettement supérieur (jusqu'à 50 %). Ce type de crépine n'existe pas en PVC.

2.2.3. Méthode de mise en place

Les ouvrages de captage dans leur majorité sont de l'un des deux types suivant :

- ouvrage à équipement monolithique (1 seul diamètre), les crépines sont alors descendues au bout des tubages pleins,
- ouvrage télescopé à crépine de diamètre inférieur à celui du tubage d'occultation des niveaux supérieurs.

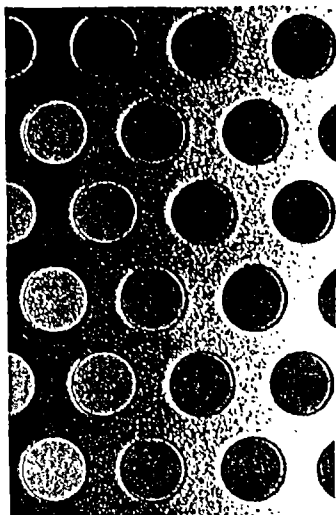
L'assemblage des crépines se fait soit alors par filetage ou par soudage. La présence de crépines simplement posées en fond de trou sont à proscrire dans la mesure du possible car ceci peut être la cause de bypass par circulation dans l'annulaire.

2.2.4. Choix du matériau

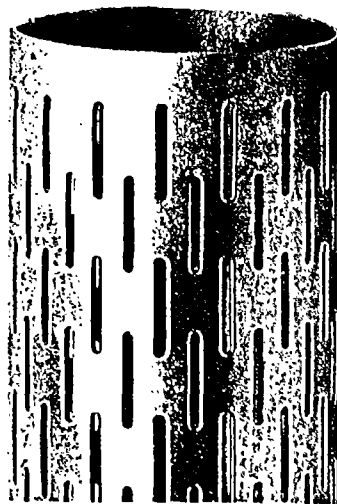
On peut se reporter au § 2.1.3. avec en plus une comptabilité à vérifier entre le choix des matériaux de tubage et de crépine (couplage électrochimique à éviter).

2.2.5. Précaution spécifique à prendre dans le cadre d'un forage d'eau minérale

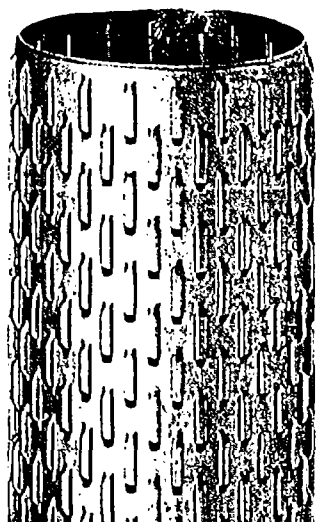
Dans les cas des eaux minérales, qui peuvent présenter une composition hors norme, la plus grande attention sera portée au choix des matériaux et à la taille des ouvertures pour éviter toute corrosion ou colmatage précoce. D'où l'importance de connaître a priori, la physico chimie du fluide capté, mais aussi son comportement hydrochimique en fonction de facteurs de vitesse (turbulence) et pression.



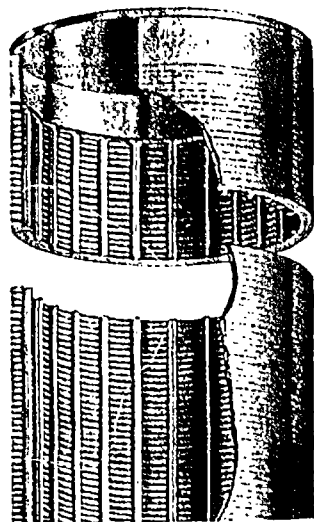
1. Trous ronds



2. Trous oblongs



3. A nervures repoussées



4. Type Johnson

Profondeur et nature des formations	Diamètre des grains retenus à 40%	Ouverture des fentes	Longueur des crépines
120 Sable moyen	0,5 mm	0,5 mm	6 m
125 Sable très grossier	1,27 mm	1,0 mm	1 m
132 Sable grossier	0,76 mm	1,25 mm	5 m
136 Sable très grossier	1,52 mm	0,75 mm	5 m
145		1,5 mm	8 m

Fig. 1 : Les différents types de crépines - critères de choix des fentes en formation hétérogène

2.2.6. Contrôle au moment de la mise en place

Il faut veiller à ce que :

- le matériel approvisionné corresponde bien aux spécifications choisies et calculées et ne soit pas endommagé au cours des transports et stockages,
- les cotes prévues de pied et de tête de crépine soient respectées,
- l'assemblage par vissage ou soudage soit fait dans les règles de l'art ; (couple de rotation, présence de gaz neutre et technique de soudure appropriée),
- l'ensemble soit nettoyé (décapé et passivé pour les aciers inox) et désinfecté avant d'être mis en place

2.2.7. Contrôle à posteriori

Il sera contrôlé :

- que lors des pompages d'essai après développement, le pourcentage de particules fines reste en dessous des limites fixées au cahier des charges,
- avec une inspection vidéo, qu'il n'y a pas de défaut apparent, d'erreur de cote.

3. MASSIF FILTRANT

3.1. OBJECTIF ET PRINCIPE

Il s'agit de mettre en place, entre la crépine et l'aquifère, un massif de gravier dont la granulométrie doit être élevée (limitation de perte de charge) tout en assurant une filtration efficace.

La mise en place d'un massif de gravier permet d'augmenter la taille des ouvertures des crépines (ou slot), de réduire la vitesse de circulation de l'eau à l'entrée de la crépine et donc d'augmenter le débit de production ainsi que la longévité de l'ensemble.

3.2. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DU MASSIF FILTRANT

Le massif sera constitué d'un matériau propre sans élément fin, de forme arrondie pour limiter les pertes de charge. Enfin, il sera caractérisé par une courbe granulométrique précise définie à partir de la courbe granulométrique propre de l'aquifère.

Il ne sera pas nécessaire de mettre en place de massif filtrant artificiel :

- ♦ lorsque la granulométrie de l'aquifère est grossière, on peut réaliser un développement naturel ou auto développement,
- ♦ lorsque l'encaissant est consolidé.

Par contre, lorsque dans les aquifères consolidés ou semis consolidés, présentent des risques d'éboulements, la mise en place d'un massif de blocage n'a pas un effet de filtre mais de soutènement.

3.3. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE

Tout comme pour les crépines, la physico chimie du fluide capté doit être prise en compte pour choisir un massif filtrant dont les éléments n'interféreront pas avec l'eau minérale (sable siliceux).

3.4. CONTROLE AU MOMENT DE LA MISE EN PLACE

Il faudra s'assurer :

- de la conformité du massif filtrant (qualité et quantité) avec les prescriptions retenues,
 - du nettoyage et désinfection du massif de gravier avant sa mise en place,
 - de la mise en place du massif dans les règles de l'art.
- ❖ dans le cas d'un forage peu profond, le massif de gravier est introduit entre le tube d'extension de la crépine et le tube de protection qui est remonté au fur et à mesure du remplissage annulaire par le gravier,
- ❖ dans le cas d'un forage profond, le massif de gravier est mis en place par un circuit continu sous pression,
- ❖ la cote supérieure du massif de gravier doit recouvrir en partie le tube plein pour disposer d'une réserve de gravier et jouer pleinement son rôle de filtre.

3.5. CONTROLE A POSTERIORI

On doit s'assurer que lors des pompages d'essai après les phases de développement, le pourcentage de fines reste en dessous des limites fixées au cahier des charges.

4. CIMENTATION

4.1. OBJECTIFS

La cimentation est l'opération qui consiste à mettre en place par simple déplacement, du laitier de ciment derrière une colonne de tubage, en une ou plusieurs fois (Fig. - page 7 bis).

La cimentation du tubage est destinée à atteindre les objectifs suivants :

- ancrer les tubages dans le terrain ou les tubes provisoires,
- empêcher toute migration de fluide d'une formation dans une autre et surtout celles productrices qui constituent l'objectif de ce forage,
- rendre l'espace annulaire étanche et empêcher la pollution par les eaux de surface,
- protéger le tubage de l'action corrosive de certains fluides ou terrain.

Pour atteindre ces objectifs, la "gaine de ciment" mise en place entre le terrain et le tubage doit être : continue, homogène, imperméable et adhérente aux parois du forage et au tubage.

4.2. METHODE DE REALISATION

Devant l'importance d'une bonne cimentation pour l'exploitation des eaux minérales, mais d'une manière plus générale pour toute action de forage, l'utilisation de moyens rudimentaires (bac ouvert, pelle manuelle pour le malaxage), l'absence de moyens de contrôle de volume, de densité sur place est à proscrire.

Les méthodes de cimentation les plus courantes sont :

- la cimentation hors de la colonne de tubage. Le pied de tube est ancré dans le terrain ou obturé. Un tube de petit diamètre est mise en place jusqu'au fond du trou dans l'espace annulaire. Le tube d'injection est retiré en fin de cimentation. Cette méthode est à réserver aux cimentations peu profondes de l'ordre de 50 m.
- la cimentation par l'intérieur du tubage à sceller (cimentation sous pression). Le pied de tube est équipé d'un sabot destructible qui permet le passage du ciment mais empêche la remontée des fluides dans le tubage. La cimentation est terminée lorsque le coulis de ciment réapparaît en surface dans l'espace annulaire avec la qualité de celui injecté.
- La cimentation au moyen d'un bouchon libre.
- La cimentation au moyen d'un bouchon libre (cimentation sous pression). Le bouchon peut être en plastique ou tout autre matière inerte, légère et destructible. Il a pour objet de séparer les deux phases d'injection (Fig. 3 - page 7 ter).

D'autres méthodes de cimentation ne sont utilisées qu'en forage type pétrolier.

Le choix de la méthode est lié principalement à la profondeur de la cimentation, l'état des parois du forage qui peuvent être régulières ou non. Dans la mesure du possible, on préférera les cimentations sous pression.

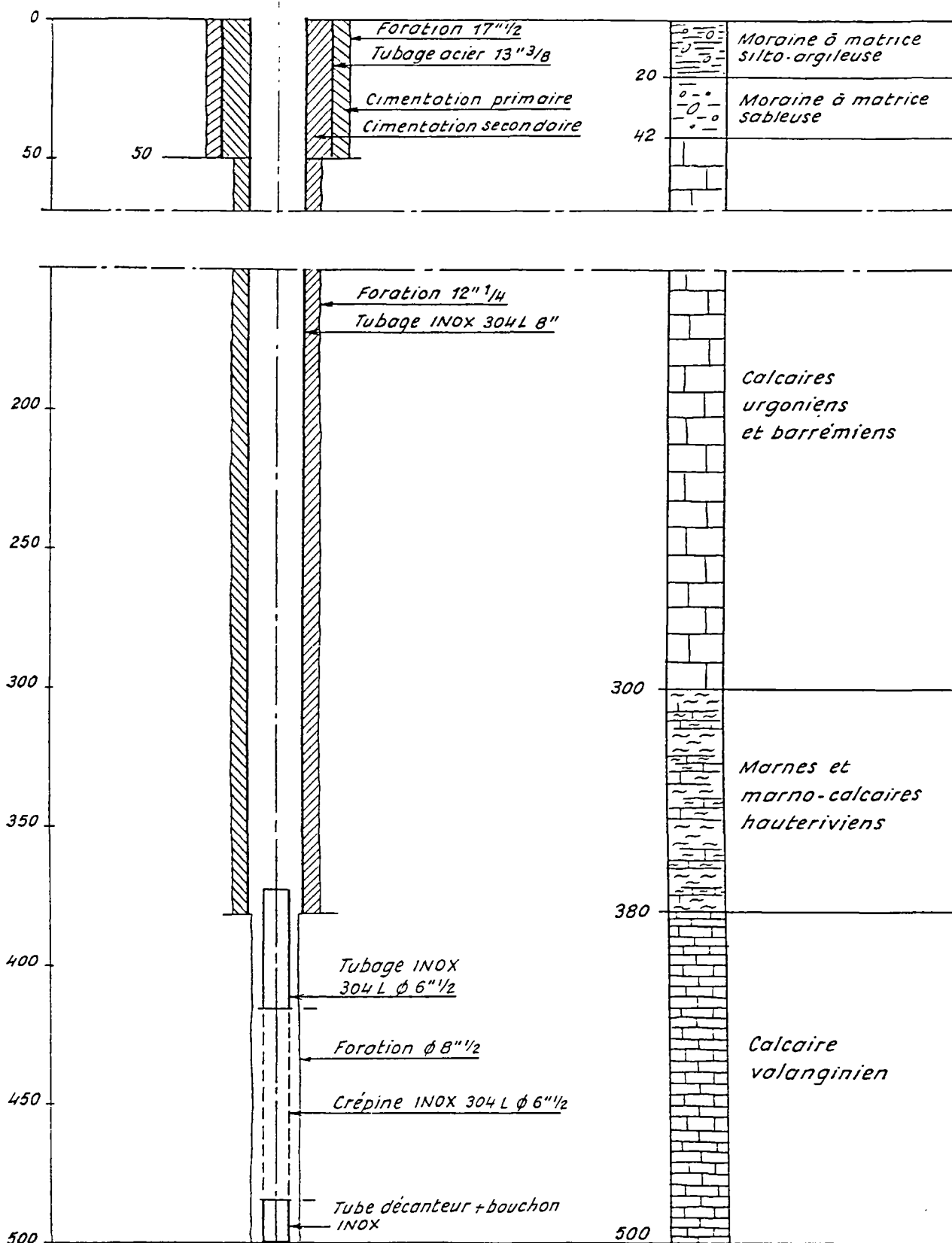
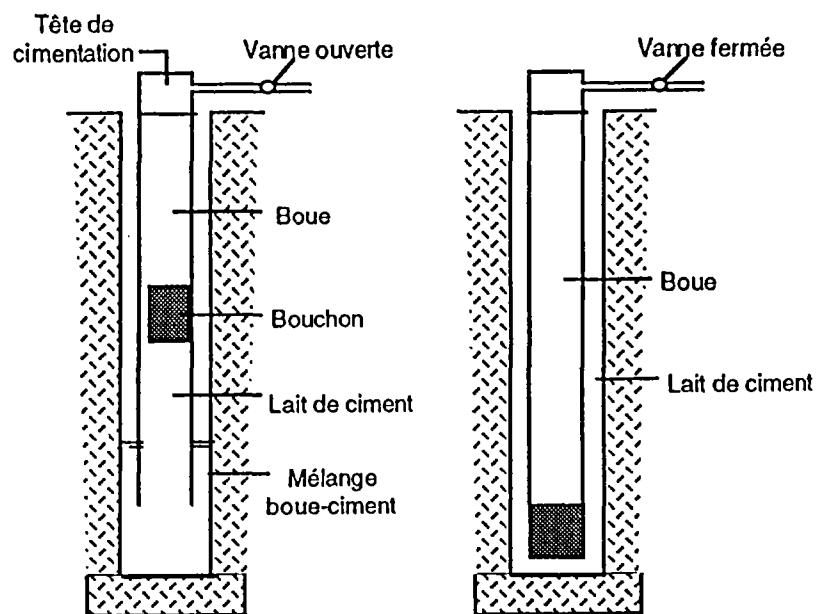


Fig. 2 : Exemple équipement en ouvrage d'exploitation avec protection en tête



Envoi d'un bouchon après injection de lait de ciment.

Fig. 3 : Schéma descriptif théorique d'une cimentation sous pression (méthode du bouchon libre)

4.3. CHOIX DU CIMENT

Le succès d'une cimentation dépend bien sûr :

- de la préparation du trou,
- du mixage et du pompage du laitier,
- du déplacement du ciment,
- du temps de prise.

mais aussi du choix du ciment et des éventuels additifs en fonction de l'environnement dans lequel il va être mis en place : température et pression dans l'ouvrage, qualité des roches encaissantes, qualité des fluides souterrains, qualité de l'eau avec laquelle sera réalisée le laitier, mais aussi matériau de tubage.

4.4. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE

Une attention particulière sera portée aux fluides en contact avec la cimentation.

Les eaux sulfatées, carbogazeuses et chaudes nécessitent systématiquement l'emploi de ciments spéciaux.

Les additifs employés ne devront pas être nocifs pour l'environnement du forage et le fluide exploité.

4.5. CONTROLE AU MOMENT DE LA REALISATION

Il s'agit d'une opération importante. Il faudra contrôler :

- la qualité du ciment employé et stocké dans de bonnes conditions, et conforme à ce qui a été spécifié, de même pour les additifs,
- la qualité de l'eau employée pour la réalisation du laitier,
- la réalisation du laitier tant en qualité qu'en quantité.

Un échantillon sera prélevé en début et en fin de cimentation et stocké pour visualiser la prise du coulis et éventuellement réaliser des éprouvettes tests.

- la mise en place du laitier conformément aux règles de l'art,
- le volume réel injecté,
- la qualité du coulis en surface dans l'espace annulaire,
- la durée du temps de prise.

4.6. CONTROLE A POSTERIORI

Une diagraphie de contrôle (Ciment Bond Log) peut être mis en oeuvre.

Il s'agit d'une diagraphie sonique où l'on mesure l'atténuation d'un spectre sonore dans le tube et le ciment.

5. DEVELOPPEMENT D'OUVRAGE

5.1. OBJECTIF

Le développement d'un forage consiste à améliorer la productivité de la formation aquifère située autour de la crépine et à stabiliser cette formation.

Cette opération s'effectue le plus souvent lorsque la colonne de captage est en place avant la mise en production du forage.

5.2. TYPE DE DEVELOPPEMENT

Les types de développement les plus couramment utilisés sont :

- le développement à l'air lift ou émulseur (Fig. 4 - page 9 bis).
Il s'agit de stimuler alternativement le forage par injection d'air filtré créant un phénomène, de flux et de reflux dans le réservoir.
- le développement par pistonage,
- le développement par pompage alterné, et surpompage,
- les développements par fracturation hydraulique; Cette technique permet d'élargir les fractures existantes ou d'en créer de nouvelles et de les maintenir ouvertes par des agents de soutènement. Cette méthode est particulièrement adaptée aux réservoirs consolidés fissurés.
- le développement par adjonction de produit chimique, le plus fréquent étant l'acide chlorhydrique utilisé dans les terrains carbonatés. Il est utilisé des polyphosphates pour des réservoirs à tendance argileuse, ou d'autres types d'acide et mélange au cas par cas : acide sulfamique, acide fluorhydrique... Cette méthode nécessite le traitement des effluents avant rejet des eaux d'exhaure dans l'environnement.

5.3. CHOIX DE LA METHODE DE DEVELOPPEMENT

On ne peut pas parler d'une méthode unique pour un type de forage et une combinaison de techniques peut être nécessaire.

Il n'y a pas de règle générale, le choix est plus guidé par l'expertise technique, l'expérience acquise sur l'aquifère, le suivi du forage et les objectifs fixés de réussite de l'ouvrage.

Une méthode de développement non maîtrisée ou utilisée dans un contexte qui ne convient pas, peut se révéler dommageable pour l'ouvrage et éventuellement pour la ressource. Par exemple, le surpompage peut créer une compaction des sédiments fins entraînant une réduction de la perméabilité ; une acidification mal menée peut aboutir à la formation de gel sur les crépines ; et certaines fracturations peuvent créer des communications inopportunes.

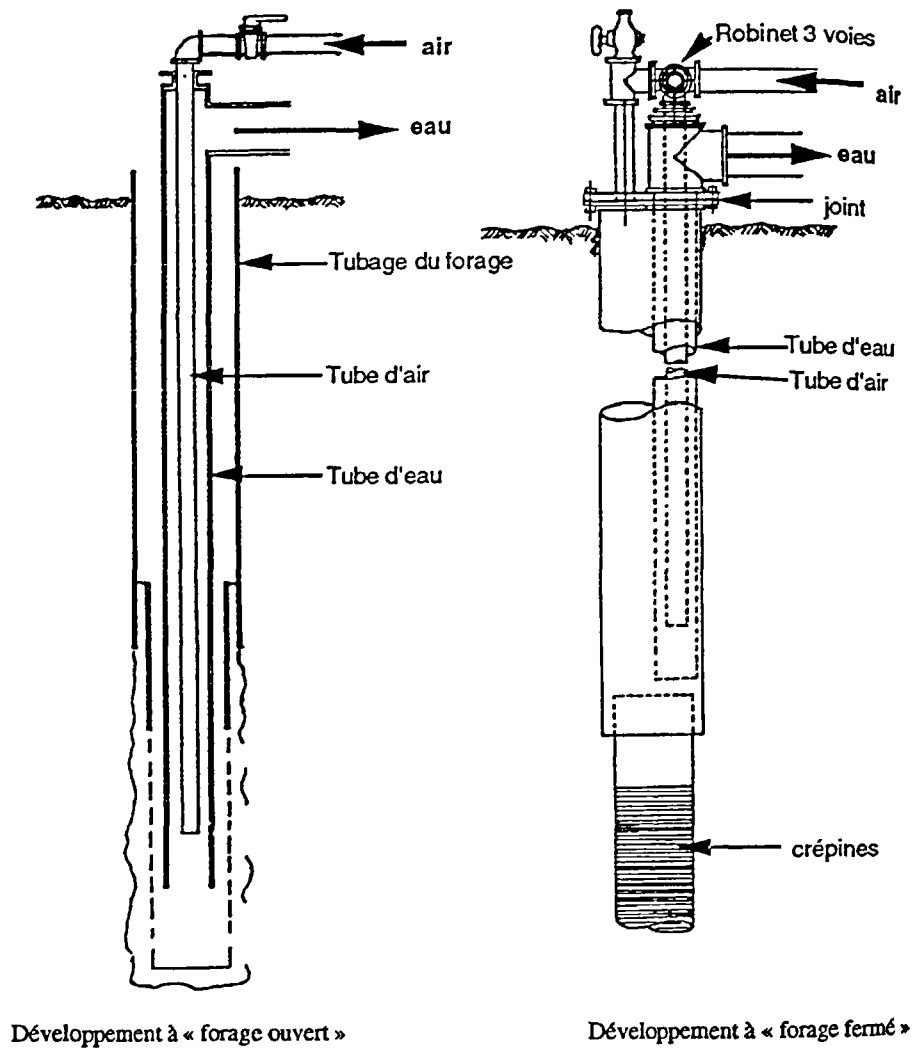


Fig. 4 : Développement à l'émulseur - schéma de principe de mise en service

5.4. PRECAUTIONS A PRENDRE DANS LE CADRE D'UN FORAGE D'EAU MINERALE

Plus que pour un forage classique on devra veiller à ce que les opérations de développement :

- ♦ ne modifient pas de façon durable, la qualité physico chimique du fluide (qualité des inhibiteurs d'acide par exemple) exploité,
- ♦ ne réagissent pas avec la colonne de captage.

5.5. CONTRÔLE AU MOMENT DE LA REALISATION

Il consiste à vérifier que la ou les méthode(s) de développement mise(s) en oeuvre se déroulent suivant les règles de l'art tant au niveau de la qualité qu'à celui de la sécurité du personnel et de l'environnement en particulier pour les développements chimiques.

Dans le cas de la présence d'un massif de gravier, on doit s'assurer que son niveau supérieur ne libère pas une partie des crépines sous l'effet du développement qui tasse généralement le massif.

En fin de développement, on contrôlera que la teneur en fine soit inférieure à celle prévue au cahier des charges.

Les opérations de complétion devront s'arrêter lorsque la capacité spécifique de l'ouvrage n'augmentera pas de façon significative après la dernière technique mise en oeuvre.

5.6. CONTROLE A POSTERIORI

Le contrôle de l'ouvrage d'un point de vue hydraulique peut révéler un développement insuffisant, ou simplement une opération à renouveler régulièrement.

6. NETTOYAGE ET DESINFECTION

Dans le cadre d'un forage d'eau minérale pour lequel la ressource ne peut être traitée avant distribution, la plus grande attention sera prise pour éviter toute rétropollution par la surface. Cela passe par un nettoyage et une désinfection du matériel et des matériaux introduits dans l'ouvrage à demeure ou en provisoire et des mesures d'hygiène renforcées de la part des intervenants sur site.

6.1. PRODUIT MIS EN OEUVRE

Ils doivent présenter une compatibilité alimentaire sans rémanence d'action à long terme. Leur sélection tiendra compte de la physico-chimie des eaux. On notera les effets souvent dévastateurs des tentatives de stérilisation massive par "eau de javel" sur les matériaux.

6.2. PRECAUTION D'EMPLOI

S'agissant généralement de produits dangereux et amenés concentrés sur sites, les opérations de dilution, d'injection et de gestion des rejets nécessitent des précautions d'usage (communication des fiches produits, procédures préalables, matériel et vêtements de sécurité).

6.3. CONTROLE AVANT ET APRES L'EMPLOI DU PRODUIT

Ces contrôles doivent comporter des mesures terrains de concentration des produits, ainsi que des prélèvements et mesures sur l'eau minérale (physico-chimique et bactériologique).

7. CONTROLES DE RECEPTION - DOSSIER DES OUVRAGES EXECUTES

Ces contrôles, essentiels, reprennent pour partie l'ensemble des contrôles à posteriori développés durant les paragraphes consacrés aux différentes phases de travaux, dont :

- la vérification de la profondeur du forage,
- un contrôle de la verticalité de l'ouvrage,
- une inspection vidéo de l'ouvrage, qui servira aussi "d'état zéro" dans la vie de l'ouvrage,
- des contrôles éventuellement par diagraphies spécifiques (contrôle de cimentation),
- un test de pompage pour vérifier la teneur en fine de l'eau d'exhaure, pour permettre de réaliser une analyse physico-chimique de réception et une analyse bactériologique adaptée au fluide prélevé.

L'entreprise fournira un dossier des ouvrages exécutés de l'ouvrage qui comprendra :

- la localisation du point,
- les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et techniques synthétisés sur une coupe,
- la copie du cahier de chantier avec le relevé des opérations et des matériaux mis en oeuvre au jour le jour,
- les certificats d'origine des matériaux et matériels employés,
- une notice d'emploi et d'entretien pour les matériels mis en place.

Les cutting clairement repérés et identifiés seront remis au maître d'ouvrage.

Le forage dans l'attente d'un équipement de production sera équipé d'un capot de protection. Celui-ci peut être étanche ou avec gestion de qualité bactérienne de l'air (filtre). Cette période inerte de l'ouvrage doit être limitée au strict minimum pour permettre un renouvellement de la colonne d'eau.

8. EQUIPEMENT D'EXHAURE DANS LE FORAGE

Il n'est pas question d'aborder l'ensemble des équipements d'une station de pompage mais seulement quelques aspects directement liés à l'ouvrage comme :

- la compatibilité avec le fluide et les matériels introduits dans le forage (pompe, colonne d'exhaure, sonde de niveau, alarme niveau haut niveau bas, câble électrique, câble de soutien de la pompe ...).
- les caractéristiques et la position de la pompe immergée dans la colonne de captage qui doit répondre aux caractéristiques géométriques, hydrauliques mais aussi hydrochimiques de cet ouvrage.
- Les équipements d'anti retour et disconnexion qui sont la seule garantie de protection contre la rétro-pollution des ressources.
- Les précautions de mise en oeuvre de tous ces matériels (nettoyage, stérilisation, travaux en environnement propre).
- Les spécifications de la tête de puits, pièce d'interface ressource / atmosphère qui cumule les fonctions de fermeture de l'ouvrage, suspension des équipements de refoulement et de gestion de l'annulaire du forage.

C'est aussi l'interface entre le point d'émergence et les équipements de l'exploitation de surface qui doivent aussi faire l'objet du même souci de qualité.

9. CONCLUSION

Plus qu'une spécificité liée aux eaux minérales en tant que fluide, c'est une maîtrise irréprochable de la qualité de la conception et réalisation de ces ouvrages qui est demandée.

La réalisation du forage comme des équipements d'exploitation en surface doit permettre de garantir et de gérer dans le temps la qualité des eaux minérales.

BIBLIOGRAPHIE

- Notes internes ANTEA
- Support de cours ANTEA : les techniques du forage d'eau (1994) - E. BERTHET
- Les eaux minérales et les matériaux en contact (1990) - G. POPOFF - JL. HONEGGER, Journal hydrogéologie 1990 n°4.
- Matériaux au contact des données alimentaires - produits de nettoyage de ces matériaux (1994) - Journal officiel de la République Française.
- Effet des matériaux sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine : influence de la normalisation européenne et de la recherche prénormative sur la réglementation nationale et européenne (1994) - JL. GODET - S. RIGAL - P. LEROY - Journal AGHTM n° 10 Octobre 94.
- Le forage d'eau (1993)- Michel DETAY - Ed Masson
- La pratique du forage d'eau (1990) - Robert LAUGAT - Ed Seesam
- Diagraphies appliquées à l'hydrogéologie (1987) - Dominique CHAPELLIER - Ed Lavoisier TEC/DOC
- Hydrochimie en forage - Approche méthodologique (1995) - Alain GADALIA - Jean Luc HONEGGER - Journal Hydrogéologie BRGM.95



Le pompage de qualification

Note technique n° 5

Juillet 1996

R E S U M E

Pièce essentielle d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'émergence, le pompage de qualification a pour objet de mettre en évidence le caractère stable, reproductible et de qualité déterminée des eaux souterraines exhaurées par l'ouvrage à qualifier.

La mise en oeuvre d'un pompage de qualification doit répondre à des critères de qualité rigoureux permettant l'obtention de données fiables sur les plans hydraulique, physico-chimique et bactériologique.

L'analyse des résultats d'un pompage de qualification, dont la durée dépend du contexte local, requiert une interprétation des données à l'échelle du gisement d'eau minérale. Il convient en effet de s'assurer de l'absence de surexploitation d'un site et de la cohérence de la demande d'autorisation formulée avec les contraintes d'exploitation d'éventuelles émergences sollicitées à proximité, dans le même contexte hydrogéologique.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. LES DIFFÉRENTS POMPAGES D’ESSAI AU COURS D’UN PROJET	2
2.1 Les tests d’orientation	2
2.2 Les tests d’évaluation	2
2.3 Le pompage de confirmation	4
2.4 Le pompage de qualification (ou certification)	6
3. LE POMPAGE DE QUALIFICATION	6
3.1 Objectif	6
3.2 Modalités de l’essai	6
3.3 Interprétation des données - présentation des résultats	9
4. CONCLUSIONS	11
BIBLIOGRAPHIE	12

Figures :

1. La programmation des pompages d’essai sur l’organigramme décisionnel d’un projet (page 3).
2. Exemple de résultat d’un test d’évaluation : la courbe caractéristique (page 5).
3. Exemple de résultat d’un pompage de confirmation : recherche du débit “utile” (page 7).
4. Exemple de résultat d’un pompage de qualification (page 10).

1. INTRODUCTION

Les pompages d'essai constituent des étapes très importantes dans un projet d'alimentation en eau puisqu'ils ont pour objet de permettre à l'utilisateur de juger si l'ouvrage réalisé répond aux objectifs fixés.

Ces objectifs peuvent être très variés selon qu'il s'agit :

- ⇒ de préciser les conditions d'exploitation d'un système aquifère à l'échelle régionale, c'est à dire la quantité d'eau qu'il est possible de prélever dans une nappe souterraine. Cet aspect requiert la connaissance des paramètres hydrauliques et leur distribution dans l'espace. On parlera "d'essai de nappe" ;
- ⇒ de préciser les meilleures conditions d'exploitation d'un ouvrage, en fonction de critères définis par l'exploitant. Cet aspect nécessite l'obtention d'informations plus ponctuelles sur le captage proprement dit. On parlera "d'essai de puits" ;
- ⇒ d'évaluer le comportement dans le temps de la qualité des eaux exhaurées. Cet aspect implique la prise en compte non seulement de la composante hydraulique mais également de la composante qualité (physico-chimique et bactériologique) ;
- ⇒ de gérer les conditions d'exploitation optimales d'un gisement exploités par plusieurs émergences, compte tenu des interférences entre les ouvrages. Cet aspect concerne la recherche du meilleur schéma de pompage sur plusieurs ouvrages avec obligation de respecter les contraintes imposées (débit/qualité).

Il apparaît ainsi clairement que la programmation d'un pompage d'essai dépendra des objectifs fixés et que son interprétation sera liée aux conditions de réalisation dans le temps (durée de l'essai) et dans l'espace (environnement de l'ouvrage testé).

La présente note technique a pour objet de préciser le contexte particulier du pompage de qualification dans le cadre d'une approche "eau minérale". Pour ce faire une logique de projet a été retenue, simulant la création d'un ouvrage destiné à être autorisé. Cette approche permet de présenter les différents pompages d'essai réalisés en cours de projet, et dont le pompage de qualification constitue généralement l'étape finale. Par cette approche l'objectif visé est non seulement de cadrer précisément le pompage de qualification en tant que tel mais encore de comprendre la logique d'investigation qui conduit à ce pompage en évitant de confondre un pompage de qualification avec divers essais intermédiaires non directement ciblés sur l'objectif de ce dernier.

Avec un objectif très pratique visant à comprendre et à juger de la qualité des informations fournies par les dossiers d'autorisation d'exploiter à l'émergence, le présent document ne s'étend pas sur les techniques d'interprétation des pompages en fonction des différents schémas hydrogéologiques. Ces techniques, complexes, et qui font appel à des moyens de calculs parfois sophistiqués¹, sont du ressort de l'hydrogéologue à qui il revient d'en expliciter l'interprétation au cas par cas.

¹ Les références d'ouvrages spécialisés sont présentées en bibliographie.

2. LES DIFFÉRENTS POMPAGES D'ESSAI AU COURS D'UN PROJET

La réalisation d'un ouvrage d'exploitation d'eau minérale suit une logique programmée depuis la reconnaissance initiale (forage de reconnaissance) jusqu'à l'exploitation (forage d'exploitation équipé). Cette logique est explicitée par l'organigramme décisionnel schématisé figure 1 (page 3) qui présente les différentes étapes du projet avec les pompages d'essai associés (ou tests).

Ce chapitre expose le principe d'enchaînement des tests conduisant au pompage de qualification proprement dit dont le chapitre suivant explicite le contexte particulier.

2.1 LES TESTS D'ORIENTATION

Il s'agit d'essais sommaires réalisés en cours de foration lorsque le fluide de forage est de l'air (foration Marteau Fond de Trou). L'essai concerne un soufflage à l'aide des tiges de forages dans l'ouvrage, sur une durée généralement très réduite (au maximum quelques heures). L'objectif fixé à ce type d'essai est de quantifier une production de l'ouvrage en instantané afin de juger si le débit identifié est susceptible de répondre aux attentes de l'exploitant. De l'interprétation de l'essai, basée sur l'expérience de l'hydrogéologue de terrain, compte-tenu du contexte hydrogéologique², dépend l'orientation du programme, qu'il s'agisse de réaliser un deuxième ouvrage de reconnaissance sur une cible distincte ou de poursuivre la foration dans la perspective d'identifier de nouveaux horizons producteurs plus profonds ou encore de stopper la reconnaissance pour quantifier de façon plus précise les capacités d'exploitation de l'ouvrage (cf test suivant).

Compte-tenu du fait que le test d'orientation a une durée réduite, le risque majeur est de surévaluer la capacité de production de l'ouvrage sur le long terme. Il convient donc d'être extrêmement prudent sur les conclusions formulées à l'issue d'un tel essai dont la finalité ne peut guère dépasser la prise de décision quant aux modalités de poursuite du programme de foration.

2.2 LES TESTS D'ÉVALUATION

Il s'agit d'essais réalisés avant complétion de l'ouvrage (quand le contexte hydrogéologique le permet), en trou nu, à l'aide d'une pompe. L'essai permet une mesure précise de débit et de niveau dans le forage, il a lieu sur une durée suffisamment significative (de 24 h à plusieurs jours) pour permettre une interprétation des données hydrauliques selon des méthodes classiques (Jacob, Theis, Handtush ...). La durée relative de l'essai permet l'acquisition de données physico-chimiques représentatives et la prise d'échantillon pour analyse.

² en contexte granitique fracturé, il est rare d'obtenir des débits supérieurs à la dizaine de m³/h par opposition à des contextes calcaires karstifiés pour lesquels des débits instantanés très importants peuvent être rencontrés (> 100 m³/h).

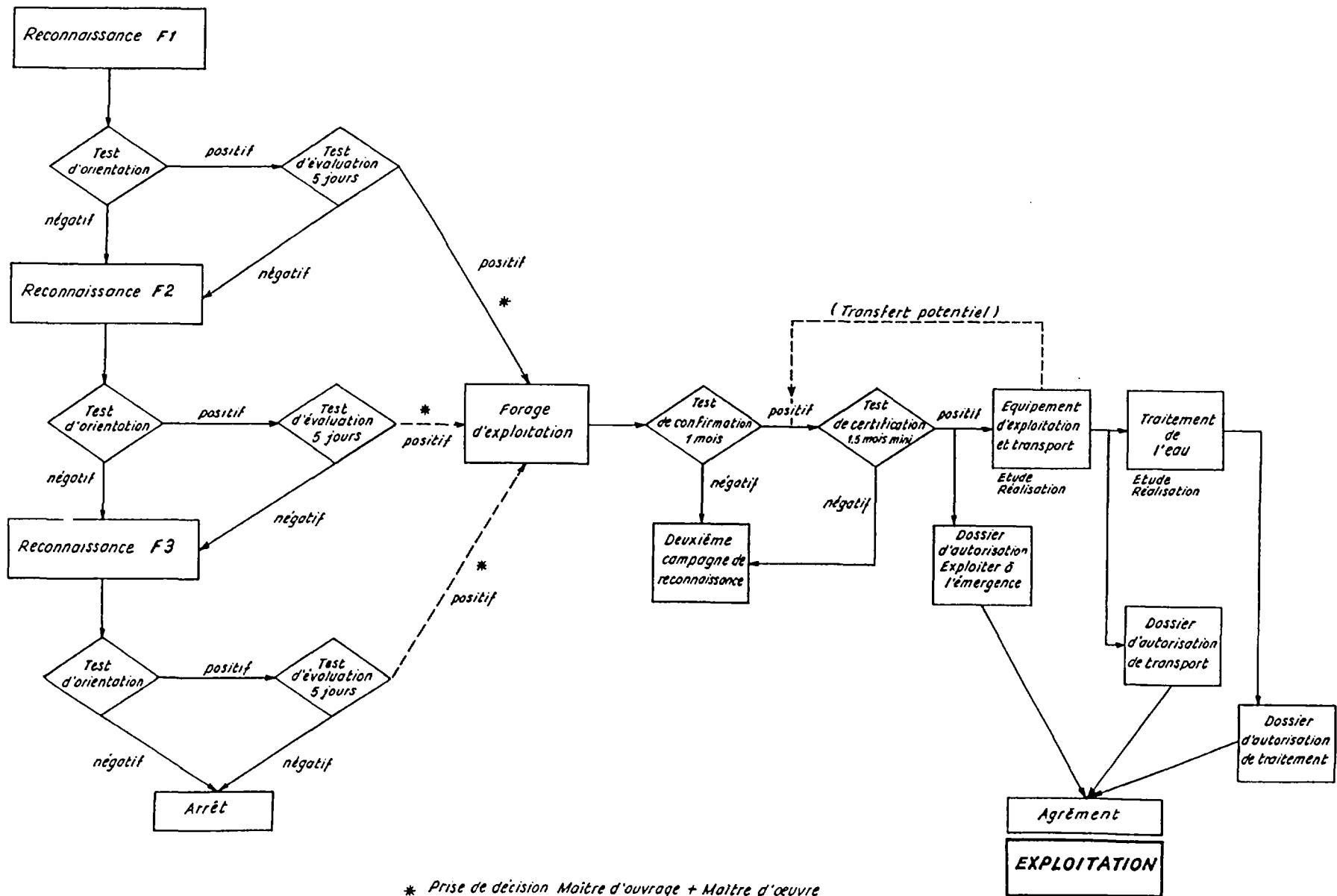


Fig. 1 - La programmation des pompages d'essai sur l'organigramme décisionnel d'un projet
(durée des tests précisée à titre indicatif)

A titre d'exemple est présentée figure 2 (page 5) une courbe caractéristique établie lors d'un test d'évaluation. Ce type d'interprétation est fréquent pour déterminer le "débit critique" qui, dans le cas des eaux minérales, peut être considéré comme le débit pouvant être maintenu en permanence sur l'ouvrage sans risque de surexploitation du gisement.

Sans entrer dans le détail de l'interprétation d'un essai avec établissement d'une courbe caractéristique, il est utile de savoir que ce type d'essai nécessite la réalisation de paliers de débits croissants et constants sur des durées égales. Chaque palier doit être interrompu par une phase de remontée aussi complète que possible (durée de remontée au minimum égale à la durée du palier de débit fixe) pour assurer une indépendance des mesures.

L'interprétation des résultats des tests d'évaluation permet de prendre la décision quant à la transformation de l'ouvrage de reconnaissance en ouvrage d'exploitation par mise en place des tubages, crépines et cimentations de protection.

Nota : La notion de débit critique est toute relative en hydrogéologie. Elle est fonction des contraintes fixées, par un exploitant ou par une réglementation, à un ouvrage particulier. Par exemple, on pourra rechercher le "débit critique" d'un ouvrage dont l'exploitation serait fixée à 2 heures de pompage en continu suivi d'un arrêt prolongé de 24 heures. Dans ce cas précis le débit recherché correspondra à la capacité maximum de pompage durant 2 heures compte-tenu des capacités de retour à l'équilibre de l'aquifère durant 24 heures.

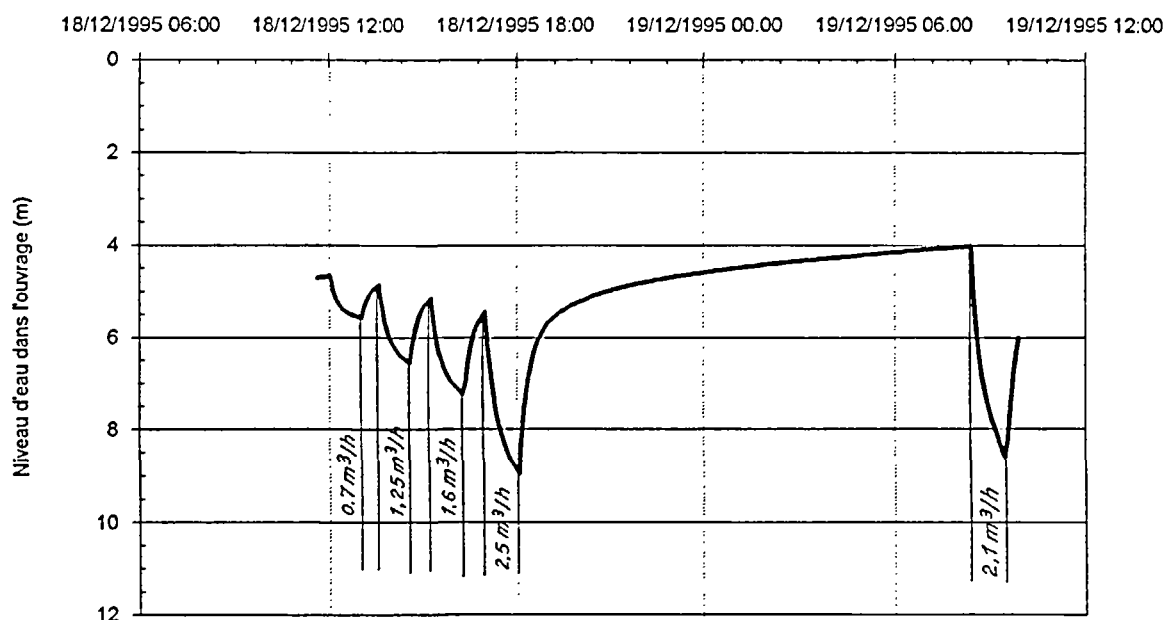
Dans d'autre cas, on pourra rechercher le "débit critique" correspondant à la nécessité de ne pas rabattre la nappe en dessous de tel niveau compte-tenu de contraintes techniques (position de la pompe, ...).

Dans le cas d'un forage d'eau minérale, il s'agit de déterminer la capacité de production en continu de l'ouvrage, à qualité chimique et bactériologique constante.

2.3 LE POMPAGE DE CONFIRMATION

Il s'agit d'un essai programmé après transformation du forage de reconnaissance en ouvrage d'exploitation. L'essai est réalisé à l'aide d'une pompe (immergée en général) avec l'instrumentation utile pour un suivi des paramètres hydrauliques (niveau dynamique et débit) et des paramètres physico-chimiques (conductivité - température). Les équipements nécessaires pour ce type d'essai sont généralement des équipements provisoires (pompe et centrale de mesures) compte tenu du fait que divers paliers de débit vont être testés, rendant difficile la définition optimale de la pompe définitive à mettre en place.

L'objet du pompage de confirmation est de valider, sur une période suffisamment longue (de 15 jours à 1 mois, voire plus), les conclusions de l'essai précédent (évaluation) en particulier en ce qui concerne des interférences avec d'autres ouvrages. Il convient au cours de l'essai d'identifier le schéma optimal de pompage pouvant être appliqué à un gisement et de dimensionner en conséquence le dispositif à mettre en place sur le forage réalisé.



Débit en m ³ /h	Rabatement en m	Température en °C	Conductivité à 25°C en $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Eh	O2	Karat	GLR
0.7	0.87	10.2	2330	6.1	105	14	32	0.45
1.25	1.87	10.5	2330	6.07	115	12	32	0.45
1.6	2.57	10.2	2300	6.1	70	14	35	0.38
2.1	4.34	10.4	2300	6.09	70	35	35	0.2
2.5	4.72	10.2	2300	6.07	81	13	35	0.15

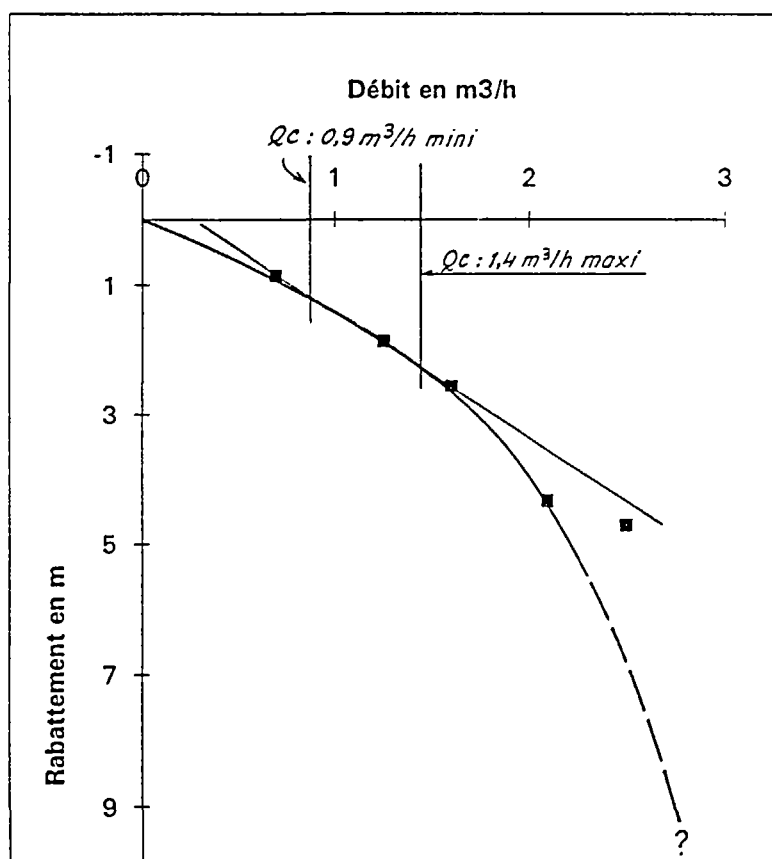


Fig. 2 - Exemple de résultat d'un test d'évaluation : la courbe caractéristique

A titre d'exemple la figure 3 (page 7) présente le résultat d'un pompage de confirmation dont on notera que les deux premiers paliers (d'une durée supérieure à 1 mois pour le premier et d'environ 15 jours pour le suivant) ont été analysés comme n'étant pas aptes à permettre une utilisation de l'ouvrage en continu à ces débits, et dont le troisième palier a guidé l'essai de qualification ultérieur et la définition du matériel de pompage définitif à mettre en place.

Nota : Les conditions de l'essai présenté par la figure 3 (exemple d'un cas réel) s'éloignent sensiblement des règles de l'art pour la conduite d'un essai avec paliers enchaînés. En effet, d'un point de vue technique, il est conseillé de travailler avec des paliers de débits croissants. Cet exemple montre la divergence entre les intérêts d'un exploitant, qui souhaitait exploiter son forage à 11 m³/h et a donc imposé de débiter son essai à ce débit, et les impératifs techniques qui ont conduit à envisager une qualification de l'ouvrage au débit de 8 m³/h.

2.4 LE POMPAGE DE QUALIFICATION

Désigné également par pompage de certification (cf figure 1), le pompage de qualification constitue l'étape ultime des séries de tests appliquées au cours d'un projet. Le chapitre suivant explicite dans le détail les caractéristiques de cette phase "finale" d'homologation.

3. LE POMPAGE DE QUALIFICATION

3.1 OBJECTIF

L'objectif du pompage de qualification est clairement précisé par la définition même d'un gisement d'eau minérale. Le pompage de qualification a pour objet, pour un ouvrage particulier, de démontrer la capacité de cet ouvrage de "fournir une eau souterraine de qualité déterminée, stable et reproductible". Il s'agit donc, si l'on reformule cette définition, de mettre en évidence le fait que l'ouvrage réalisé peut permettre l'exploitation d'un débit fixé sans induire de surexploitation du gisement (stabilité hydraulique), d'un fluide (eau et gaz) dont les caractéristiques restent stables, aux fluctuations naturelles près (stabilité physico-chimique), et dont la qualité bactériologique demeure conforme. Ces caractéristiques, hydraulique, physico-chimique et bactériologique, doivent être mises en évidence en utilisation continue de l'ouvrage, ce qui explique la nécessité d'un essai de durée conséquente.

3.2 MODALITÉS DE L'ESSAI

Le matériel mis en oeuvre durant un essai de qualification doit permettre l'acquisition de données fiables. Ainsi, si le système de pompage doit pouvoir assurer le maintien d'un débit constant (contrôlé à l'aide d'un débitmètre), il est en outre fortement conseillé de mettre en place un dispositif de suivi permanent des paramètres majeurs (niveau dynamique, conductivité, température). La généralisation des systèmes d'acquisition automatique de données permet de nos jours l'utilisation aisée de centrale de mesure autorisant un suivi longue durée, à pas de temps horaire, des 4 paramètres cités (débit inclus).

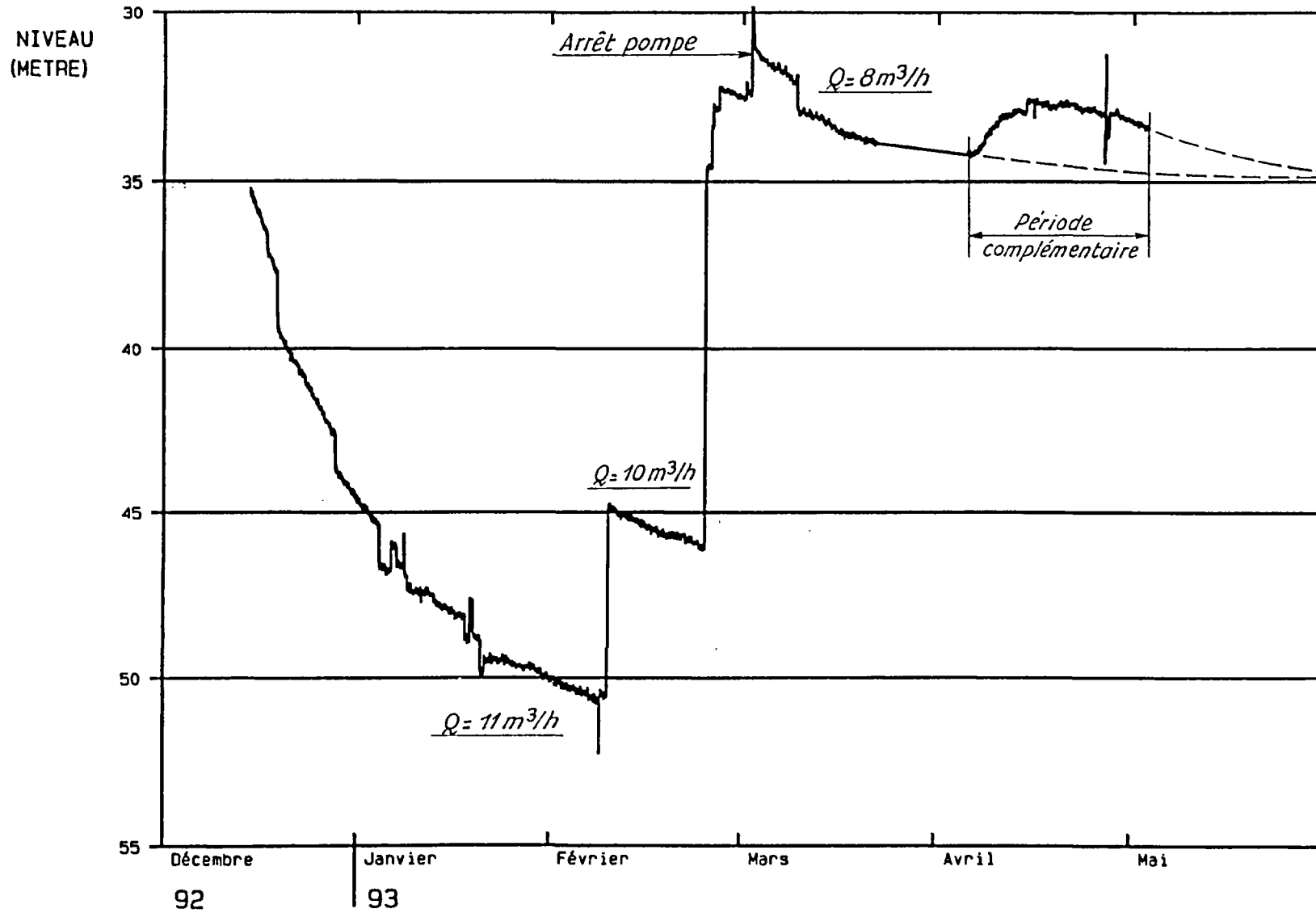


Fig. 3 - Exemple de résultat d'un pompage de confirmation : recherche du débit "utile"

Le suivi automatique doit être contrôlé par des mesures in situ à l'aide de matériel portable étalonné.

Ces contrôles ont pour objet de valider les informations fournies par les sondes de mesures et au besoin de recalibrer le système (si des dérives sont observées, ce qui est souvent le cas pour la conductivité notamment).

En parallèle à l'acquisition des données telles mentionnées ci-dessus, des prélèvements à fin d'analyse doivent être opérés (physico-chimique, bactériologique, type Alimentation en Eau Potable, radioactivité, isotopes, ...) en fonction du contexte local (données disponibles par ailleurs). La fréquence des prélèvements doit permettre de juger de la stabilité dans le temps de la composition physico-chimique de l'eau captée et de l'absence de toute contamination.

Concernant la durée de l'essai, il n'existe pas de règle stricte en la matière et l'on pourra considérer que l'essai s'est déroulé sur une durée suffisamment longue lorsque l'on jugera que la stabilité sur le plan hydraulique est assurée en parallèle à l'absence de dérive significative sur la conductivité et la température. La notion de stabilité est primordiale pour le dossier et il convient d'en juger au cas par cas en fonction du contexte hydrogéologique local et en intégrant les données acquises lors des essais antérieurs. Il peut se produire que l'essai soit perturbé, sur le plan hydraulique, par des phénomènes particuliers tel, par exemple, la recharge de l'aquifère liée à des précipitations (cf figure 3 - page 7 - dernier palier). De tels phénomènes nécessitent une interprétation du comportement hydraulique du gisement (transfert de pression en nappe captive dans le cas de la figure 3). En aucun cas la qualité physico-chimique ou bactériologique de l'eau exhaurée ne doit être affectée par ces événements (ce qui traduirait, a priori, l'existence d'infiltrations directes).

A titre indicatif il est rare qu'un essai de qualification ait une durée inférieure à 1 mois. On peut considérer en outre qu'un minimum de 3 analyses (éléments majeurs et bactériologie) est indispensable pour l'instruction du dossier.

Nota 1 : L'absence de variation notable de la conductivité sur l'enregistrement en continu en cours d'essai ne traduit pas nécessairement la constance de la composition physico-chimique de l'eau exhaurée. Il convient d'étudier en parallèle les résultats des analyses programmées durant l'essai pour statuer quant à l'obtention d'une stabilité satisfaisante sur le plan physico-chimique.

Nota 2 : Pour le cas où l'ouvrage qui fait l'objet d'un essai de qualification se situe dans un gisement exploité par plusieurs ouvrages (plusieurs émergences sur un même gisement d'eau minérale), il est indispensable de suivre le comportement de l'ensemble de ces émergences pour permettre de juger de l'interférence entre ouvrages et en définitive de la capacité de production à l'échelle du gisement. La qualification d'un ouvrage à un débit donné dépend nécessairement des conditions imposées par ailleurs. La surveillance de l'ensemble des ouvrages est à exercer à tous les stades d'un projet.

Nota 3 : Il existe des logiciels performants d'interprétation d'essais de pompage dont l'objectif est généralement de préciser les caractéristiques de la formation aquifère (transmissivité, coefficient d'emmagasinement) et qui autorisent des simulations de comportement dans le temps dont la validité dépend du calage sur une période d'essai réelle in situ. Ces extrapolations dans le temps peuvent fournir des indications utiles cependant, il convient de garder un esprit très critique quant aux résultats, qui restent théoriques, et risquent de diverger par rapport à la réalité (effet de limites éloignées dont l'influence n'aurait pas marqué les données prise en compte pour le calage).

3.3 INTERPRÉTATIONS DES DONNÉES - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation des données d'un pompage de qualification doit être une approche globale du gisement, et porter non seulement sur le comportement du forage à qualifier mais également sur le comportement des autres émergences situées dans le même gisement d'eau minérale. A titre d'exemple la figure 4 (page 10) présente les résultats d'un suivi réalisé pour la qualification d'un forage (n° 2) exploité dans un gisement où 2 autres forages (n° 1 et 3) sont utilisés, dont un forage (n° 3) concerne une eau de source pour lequel la caractérisation physico-chimique sort du contexte eau minérale (d'où l'absence de suivi conductivité température).

Ce type de présentation des résultats permet d'apprécier :

- ⇒ la stabilité sur le plan hydraulique des différents ouvrages (cf niveaux et débits) pour une durée d'essai dépassant 1,5 mois pour l'exemple proposé ;
- ⇒ la stabilité sur le plan physico-chimique des forages "eau minérale" du site (cf conductivité et température des forages 1 et 2), aux fluctuations naturelles près.

Les informations graphiques doivent être complétées par l'examen des résultats des analyses physico-chimiques réalisées en cours de pompage (3 prélèvements dans le cas présenté). En outre, l'ensemble des analyses bactériologiques (type eau minérale, c'est-à-dire sur 250 ml) réalisées doit démontrer la conformité du site sur le plan sanitaire.

Nota : Certaines fluctuations d'ordre hydraulique peuvent être liées à l'influence de la recharge induite par des précipitations (voir exemple figure 3 lors de la période complémentaire au débit de 8 m³/h). Lorsque de tels phénomènes se produisent, il convient d'évaluer si la recharge observée est liée à l'infiltration directe d'eau de surface (avec les risques qualité que cela comporte) ou au transfert de pression dans le cadre d'un aquifère captif. Cela suppose une analyse des données en rapport avec le contexte hydrogéologique local et la programmation d'analyses (prélèvements) soigneusement orchestrés (en corrélation avec les événements pluvieux et fonction des réactions de l'aquifère) pour permettre de juger de l'absence de variations qualité dans le temps.

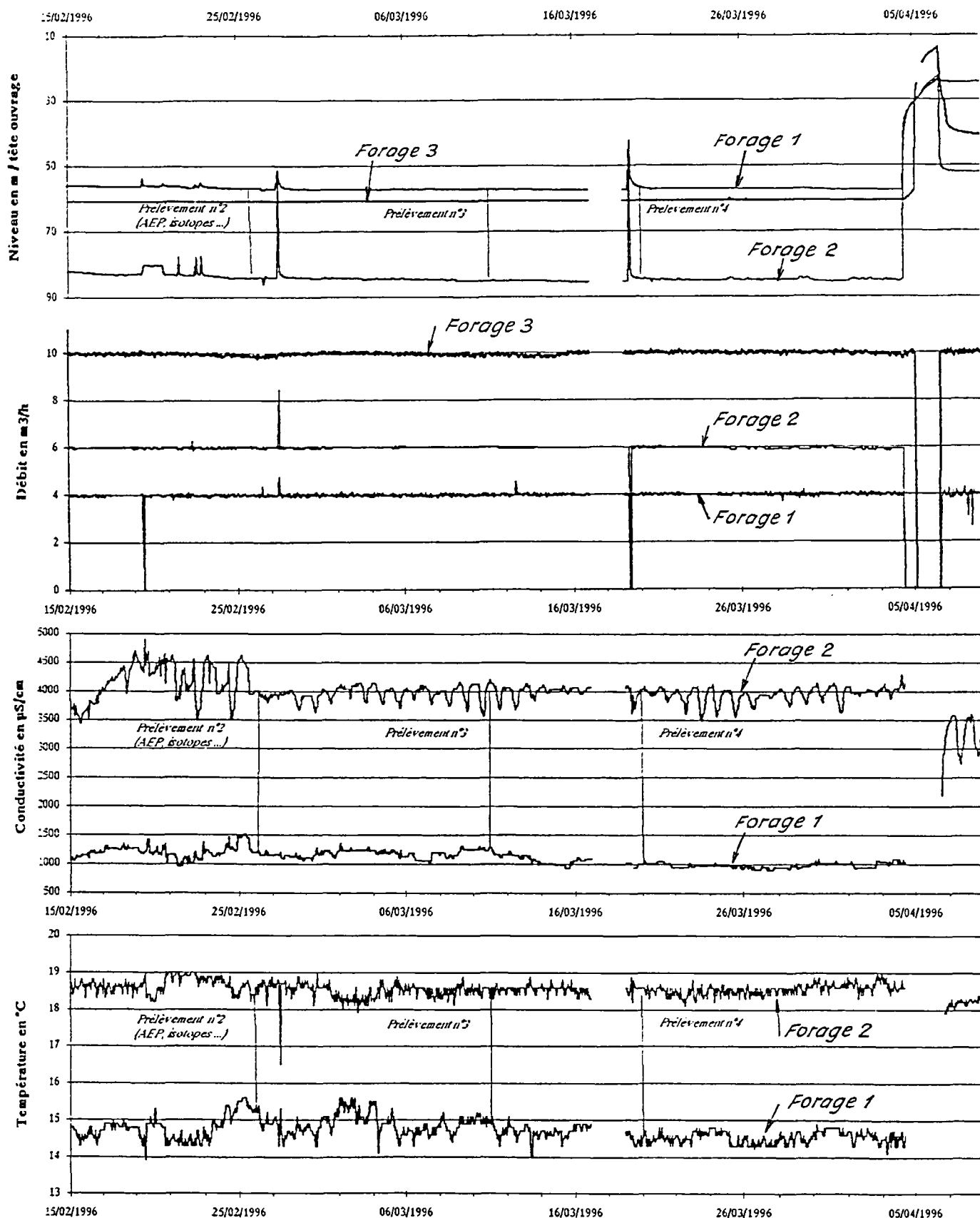


Fig. 4 - Exemple de restitution de données d'un pompage de qualification

4. CONCLUSIONS

Le pompage de qualification, pièce maîtresse d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'urgence, constitue l'étape finale d'une série d'essais généralement programmés dans le cadre d'un projet.

La définition des conditions d'essai de qualification est étroitement liée au contexte local (hydrogéologie, environnement du forage par d'autres urgences, résultats des essais préliminaires, ...).

S'agissant de mettre en évidence le caractère stable et reproductible d'une eau souterraine de qualité déterminée, l'essai de qualification sera programmé sur une durée suffisante pour permettre de juger de la stabilité sur les plans hydraulique, physico-chimique et bactériologique.

Pour ce faire, la présentation d'un suivi rigoureux dans le temps, complété par des analyses en laboratoire, est nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- ⇒ *Interprétation et discussion des pompages d'essai* - International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen the Netherlands 1974 - G.P. KRUSEMAN - N.A. DE RIDDER - A. MEILHAC - Bulletin 11F.

- ⇒ *Hydrogéologie quantitative* - G de Marsilly - Edition MASSON - 1981

- ⇒ *La pratique des pompages d'essai en Hydrogéologie* - B. GENETIER - Edition du BRGM - 1992.

- ⇒ *Interprétation des pompages d'essai* - Document ANTEA - 1994 - M. VANDENBEUSCH et C. EBERSCHWEILER.



Périmètre sanitaire d'urgence

Note technique n° 6

Juillet 1996

R E S U M E

La zone d'urgence d'une eau minérale est un secteur où cette eau peut être particulièrement sensible à la qualité de l'environnement de surface ; une évaluation des risques de vulnérabilité doit obligatoirement figurer dans le dossier de demande d'autorisation, et c'est à la DRIRE, au vu de cette analyse, d'apprécier la nécessité de délimiter un périmètre sanitaire d'urgence et de définir les prescriptions techniques qui s'y rattachent.

La délimitation de ces périmètres s'avère souvent délicate, car elle procède le plus souvent d'un compromis entre ce qui serait techniquement souhaitable, et ce qui est en réalité possible.

C'est pourquoi on s'attachera à vérifier au préalable, que la conception du captage et les conditions d'exploitation proposées sont bien adaptées à l'hydrogéologie, et contribuent à renforcer la protection naturelle de l'eau minérale.

Quelques exemples, illustrant plusieurs cas possibles et extraits d'arrêtés d'autorisation récents, sont présentés et commentés en annexe.

SOMMAIRE

1. TEXTES DE REFERENCE	1
2. ETAT DES LIEUX	2
3. RAPPEL DE LA NOTION DE GISEMENT	3
4. PROBLEME POSE PAR LA ZONE D'EMERGENCE	3
4.1 Un captage adapté à l'hydrogéologie	5
4.2 Respect de conditions d'exploitation clairement définies	5
5. PERIMETRES SANITAIRES D'EMERGENCE <i>Approche proposée</i>	5
6. PROPOSITION DE DELIMITATION D'UN PERIMETRE SANITAIRE D'EMERGENCE	6
6.1 Nouvelle exploitation en projet	6
6.2 Exploitation existante	6
7. PRESCRIPTIONS REGLEMENTAIRES	7
8. CONCLUSIONS	8

ANNEXES

Six exemples extraits d'arrêtés récents	9 à 14
---	--------

1. TEXTES DE RÉFÉRENCE

- Circulaire du 18 juin 1937
- Décret 57/404 du 28 mars 1957 (article 4 § 3 - Article 5)
- Circulaire du 23 juillet 1957 (§ B3C)

Pas plus la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, que les nouveaux décrets en préparation relatifs aux eaux minérales, ne prévoient de modification des textes, concernant ces points.

Extraits :

18 juin 1937 :

...je vous demande en conséquence de prier les Services des Mines ainsi que votre Conseil Départemental d'Hygiène, de bien vouloir déterminer, lors de chaque demande d'autorisation, la surface de la zone définie ci-dessus et qui constituerait ainsi le "périmètre sanitaire d'urgence" reconnu strictement indispensable pour éviter toute pollution proche.

28 mars 1957 (décret) (art. 4 § 3) :

Le dossier de demande en autorisation de livrer ou d'administrer au public l'eau minérale d'une source, telle qu'elle se présente à l'urgence doit comporter :

....

Le cas échéant, une copie des actes établissant les possibilités qu'a juridiquement le demandeur d'assurer la protection sanitaire de sa source.....

Art. 5

....Celui-ci (le Service des Mines) peut exiger du demandeur l'acquisition des droits de propriété ou de servitude permettant d'en assurer la protection sanitaire ...

En cas de désaccord avec le demandeur, l'Ingénieur en Chef des Mines en réfère au Secrétaire d'Etat à la Santé Publique ...

23 juillet 1957 (§B3C) (Circulaire) :

...on sait en effet, qu'il est une phase critique de la circulation des eaux minérales, localisée aux approches du point d'émergence et caractérisée par la possibilité du mélange de l'eau minérale avec les eaux douces environnantes, parfois polluées, voir même avec des eaux usées.

Il est évident qu'il ne saurait être envisagé d'autoriser l'exploitation d'une source qui, avis pris des services et organismes compétents, serait reconnue insuffisamment protégée contre de tels risques de pollution ... le nouveau texte ... donne à l'Ingénieur des Mines ... le pouvoir d'exiger la constitution d'un périmètre de protection sanitaire.

Vous voudrez bien en outre inviter Messieurs les Ingénieurs des Mines et Messieurs les Directeurs Départementaux de la Santé à veiller à ce que dans les dossiers produits figurent tous éléments utiles d'appréciation à l'égard des risques de pollution...

En résumé :

- le risque de vulnérabilité de l'eau minérale, aux abords immédiats du captage, ne peut être négligé ;
- une évaluation de ces risques doit obligatoirement figurer dans le dossier de demande d'autorisation d'exploitation à l'émergence ;
- la délimitation d'un périmètre sanitaire d'émergence, avec les contraintes qui l'accompagnent, est laissée à l'appréciation de l'Ingénieur des Mines ;
- la protection sanitaire du point d'émergence est l'affaire du propriétaire de la source. C'est pourquoi, il doit avoir la propriété des terrains concernés ou être détenteur de servitude à son profit sous forme d'un contrat de droit privé ;
- ce périmètre ne doit pas être confondu avec le périmètre de protection (art. L736 du Code de la Santé Publique) qui vise la protection de l'ensemble du gisement pour les sources déclarées d'intérêt public.

2. ETAT DES LIEUX

Dans la pratique :

- les captages (sources) dont les autorisations n'ont pas été renouvelées depuis 1937, sont souvent dépourvus de périmètres sanitaires d'émergence ; ceci concerne notamment :

- . les sources, autorisées avant 1900, sans limitation de durée ;
- . certaines sources ayant bénéficié de Déclaration d'Intérêt Public (DIP), avant 1900 notamment, sans autre arrêté d'autorisation.
- les captages ayant fait l'objet d'autorisation après 1937, et surtout après 1957, sont généralement dotés de tels périmètres ;
- l'expérience, la lecture des rapports d'instruction, des avis de la DDASS et des CDH, mettent en évidence de fréquentes confusions :
 - . entre la réglementation des eaux minérales, et celle, bien différente des eaux d'adduction publique (interventions imposées d'hydrogéologues agréés ; mentions dans les dossiers de "Périmètres sanitaires d'urgence immédiats", délimitation de Périmètres rapprochés, etc...),
 - . entre périmètre sanitaire d'urgence et périmètre de protection (articles L736 et suivants du Code de la Santé Publique).

3. RAPPEL DE LA NOTION DE GISEMENT (Fig. 1 - page 4)

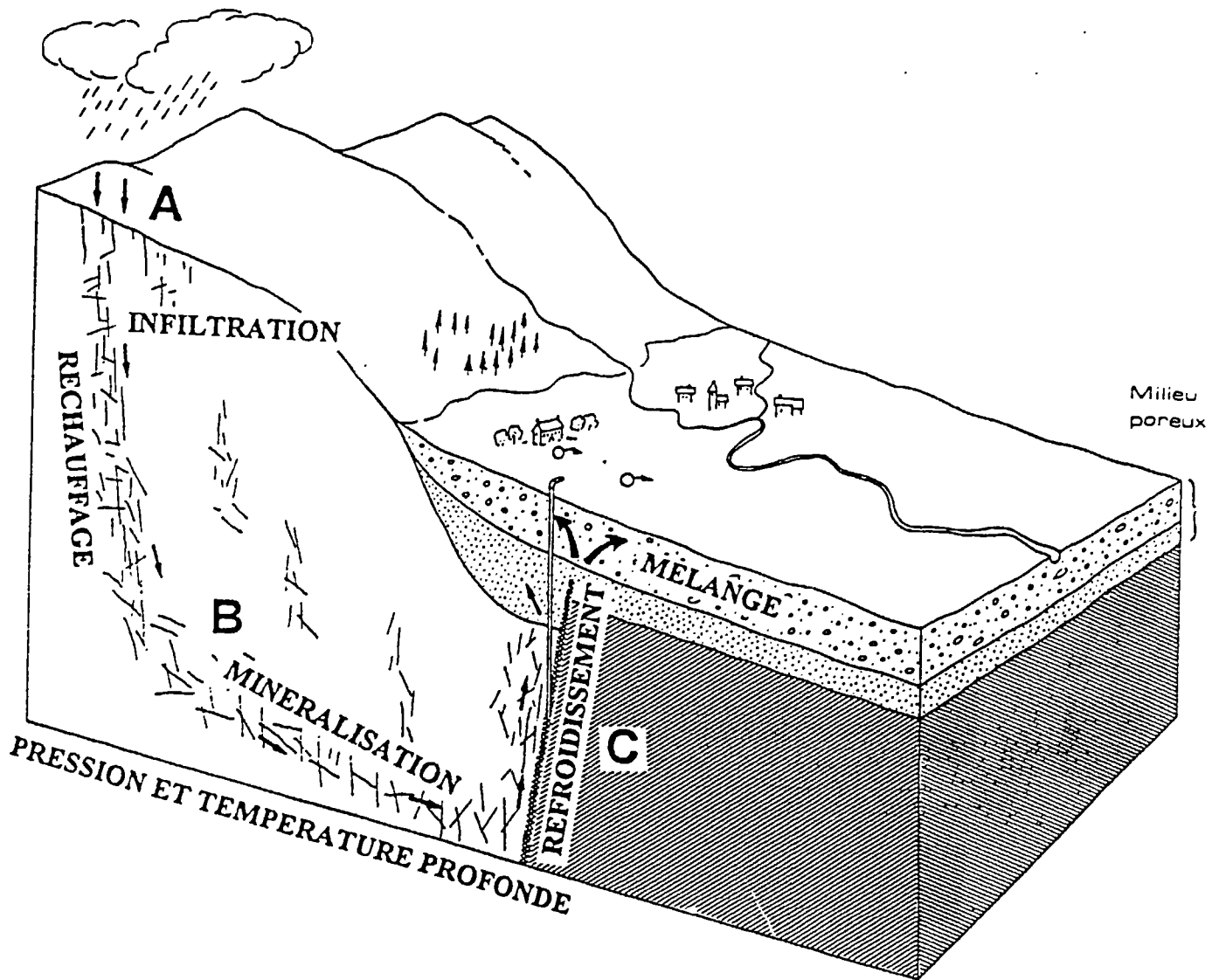
C'est l'ensemble de la structure géologique en 3 dimensions au sein de laquelle l'eau, après s'être infiltrée dans la zone d'alimentation A, se minéralise au cours de son parcours souterrain (zone B) avant de remonter en surface au droit de la zone d'émergence C.

Avant de pouvoir qualifier cette eau d'eau minérale, il faut notamment faire la preuve que, du fait de son circuit souterrain, cette eau est naturellement "à l'abri de tout risque de pollution" (décret du 6 juin 1989).

4. PROBLÈME POSÉ PAR LA ZONE D'ÉMERGENCE

Quelle que soit l'excellence de la protection naturelle (géologique et hydrogéologique) offerte par le gisement, celle-ci s'amoindrit nécessairement au niveau de cette zone ; l'eau minérale en se rapprochant de la surface peut devenir vulnérable, ne serait ce que parce qu'elle sera amenée à traverser un milieu, ou des nappes d'eau différentes, eux-mêmes vulnérables à une dégradation de la qualité de l'environnement de surface.

Figure 1



LES SYSTEMES HYDROTHERMAUX

D'autre part, et c'est là une caractéristique inhérente aux conditions d'exploitation de la plupart d'entr'elles, notamment des sources anciennes, elles sont généralement situées en plein coeur ou à proximité immédiate de centres urbains ou d'installations industrielles, ce qui entraîne des risques de vulnérabilité accrus ; la délimitation d'un périmètre sanitaire d'émergence est donc indispensable.

Cependant dans de tels contextes, l'acquisition de la maîtrise foncière des terrains concernés par le périmètre sanitaire d'émergence peut s'avérer difficile.

De fait, les DRIRE sont fréquemment amenées dans cette démarche à faire un choix entre "ce qui serait souhaitable et ce qui est possible".

C'est pourquoi la délimitation du périmètre sanitaire d'émergence et la définition des prescriptions qui s'y rattachent ne devront donc être faites qu'en dernier lieu, et après avoir mis en oeuvre les autres approches permettant de renforcer la protection naturelle de l'émergence.

Quelles sont ces approches ?

4.1 - UN CAPTAGE ADAPTÉ À L'HYDROGÉOLOGIE

Le choix de la technique de captage doit être adapté aux caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'émergence, afin d'assurer un captage de l'eau, dans des conditions optimisées de sécurité (un programme de tubage et de cimentation du forage adapté à la coupe géologique de façon à capter l'eau sous un écran géologique étanche - argiles - marnes, etc...).

4.2 - RESPECT DES CONDITIONS D'EXPLOITATION CLAIREMENT DÉFINIES

Un respect strict des conditions d'exploitation (débit, rabattement, surveillance, ...) précisées dans le rapport d'instruction et reprises dans l'arrêté d'autorisation permet également de renforcer la sécurité sur la qualité de l'eau.

5. PÉRIMÈTRES SANITAIRES D'ÉMERGENCE

Approche proposée

5.1 Analyse préalable du niveau de protection naturelle du système considéré.

Le dossier de demande d'autorisation doit obligatoirement comporter un développement de ce thème, complété éventuellement par une analyse des activités de surface existantes dans le voisinage immédiat.

- 5.2** Analyse de l'adaptation du captage aux conditions hydrogéologiques de la zone d'urgence, dans un souci de renforcement de la protection de l'eau captée.
- 5.3** Analyse de la compatibilité des conditions d'exploitation envisagées avec ce souci de protection.
- 5.4** Définition du périmètre sanitaire d'urgence.

6. PROPOSITION DE DÉLIMITATION D'UN PÉRIMÈTRE SANITAIRE D'URGENCE

Deux cas de figure peuvent être distingués :

6.1 NOUVELLE EXPLOITATION EN PROJET :

Sur de tels sites où la pression foncière n'est pas encore trop importante, les captages doivent être protégés par un périmètre sanitaire d'urgence répondant au strict nécessaire (quelques centaines de m²).

De plus, bien que cela ne corresponde pas exactement à l'esprit de la réglementation, il est souhaitable, dans la mesure du possible, et en accord avec le propriétaire de la source, d'étendre le périmètre sanitaire d'urgence sur une zone aussi importante que possible, en vue d'assurer par la même occasion une protection du gisement, au moins partielle.

6.2 - EXPLOITATION EXISTANTE :

La délimitation d'un périmètre sanitaire d'urgence est souvent plus délicate et c'est dans de tels cas que l'appréciation préalable de la sécurité offerte par l'hydrogéologie, le captage adapté et les conditions d'exploitation proposées prend tout son sens.

Dans la pratique, toutes les possibilités existent, et peuvent être recommandées le cas échéant :

- périmètre sanitaire d'urgence limité à la chambre de captage,
- périmètre sanitaire constitué par l'abri ou le local de tête de puits,
- périmètre sanitaire constitué de parcelles de terrain plus ou moins étendues autour du captage.

Les objectifs d'un tel périmètre peuvent être différents :

- si la protection sanitaire offerte par la combinaison de l'hydrogéologie et du captage est considérée comme satisfaisante, le périmètre sanitaire d'urgence peut n'avoir comme vocation que d'assurer la sécurité "physique" du captage qui, lui-même, assure la protection sanitaire (cas des périmètres sanitaires d'urgence constitués par l'abri ou le local de tête de puits d'un forage) ;
- si la protection sanitaire obtenue par la combinaison de l'hydrogéologie, du captage et de ses prescriptions d'exploitation n'apparaît pas suffisante (à l'égard au moins de tel ou tel type de risque lié à l'environnement de surface) délimitation d'un périmètre sanitaire d'urgence plus ou moins étendu en fonction des possibilités que laisse la pression de l'occupation des sols.

Attention, toutefois que mieux vaut un périmètre sanitaire d'urgence plus restreint, mais assorti de prescriptions réglementaires claires et faciles à faire respecter qu'un périmètre sanitaire d'urgence plus étendu et des prescriptions soit floues, soit strictes mais irréalistes compte tenu de son étendue.

7. PRESCRIPTIONS REGLEMENTAIRES

En proposant ces prescriptions, il faut bien garder à l'esprit le but recherché :

- protection physique de l'ouvrage de captage proprement dit (forage, puits, captage) ;
- protection sanitaire des abords immédiats.

L'ouvrage de captage doit donc être protégé par un édifice (fosse, abri, local, ...) conçu dans les règles de l'art (aération, protection contre les eaux de ruissellement, évacuation des eaux). Cet édifice doit être inviolable et éventuellement muni d'un système d'alarme.

L'intérieur de l'édifice doit être maintenu constamment en état de propreté ; il ne doit pas servir d'entrepôt.

La protection sanitaire des abords immédiats doit être assurée au moyen de prescriptions fixées dans l'esprit de la circulaire du 18 juin 1937 en veillant à ce que "soient prohibés tous actes ou travaux dont les conséquences seraient de nature à compromettre la pureté des eaux de la source".

En pratique, il sera généralement exigé que le périmètre sanitaire d'urgence soit clos.

Cependant, dans le cas de périmètre sanitaire d'urgence très étendus (cf § 6.1) cette disposition pourra être atténuée en limitant l'espace clôturé aux abords immédiats du captage.

NOTA : En principe, dans le périmètre sanitaire d'urgence, sont prohibés “tous actes ou travaux” ; bien entendu, cette interdiction ne s'applique pas aux travaux d'entretien du captage proprement dit ou aux travaux de recaptage de la source.

8. CONCLUSION

Toute la philosophie de la démarche à suivre, peut être résumée de la façon suivante :

- le contexte hydrogéologique de l'eau minérale captée doit être connu ;
- le choix de la technique et la conception du captage ainsi que les conditions d'exploitation doivent être guidés par le souci de renforcer la protection naturelle hydrogéologique de l'eau captée ;
- tout dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'urgence une eau minérale doit comporter explicitement les éléments permettant d'apprécier les risques de vulnérabilité de l'eau captée, notamment dans la zone d'urgence, ainsi que les mesures prises pour y pallier ;
- la délimitation du périmètre sanitaire d'urgence et la définition des prescriptions qui s'y rattachent doivent être effectuées en fonction de tous ces paramètres ;

Enfin, il est souhaitable que le rapport d'instruction de la DRIRE comprennent également le projet d'arrêté d'autorisation avec notamment le périmètre sanitaire d'urgence proposé et les prescriptions particulières qui s'y rattachent.

QUELQUES EXEMPLES EXTRAITS D'ARRÊTÉS RÉCEMMENT PARUS

Exemple n° 1

ARTICLE 4 :

Le débit d'exploitation maximal autorisé du captage est de 40 m³/h.

ARTICLE 5 :

Le captage est un puits de quatre mètres de diamètre, bétonné intérieurement, dont l'isolement a été complété, au fond, par un anneau de béton de deux mètres de hauteur.

La nappe est libre et l'exploitation s'effectue par pompage, par l'intermédiaire des 3 drains rayonnants sub-horizontaux situés à 15 mètres de profondeur, en acier inoxydable, de 150 mm de diamètre et de 5 et 2 % de pente, dont seulement 2 sont utilisés, le troisième étant improductif. La surveillance de la nappe s'effectue par l'intermédiaire de prélèvements sur le puits central et par plusieurs piézomètres. Un dispositif de pompage automatique constitué d'un groupe de 2 pompes permet de stabiliser le niveau piézométrique afin de prévenir les risques de pollution par infiltration verticale directe.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'émergence du captage d'une superficie de 8 ha.97 ares, est situé sur la parcelle cadastrée n° 78, section AX.

A l'intérieur de ce périmètre sont interdits tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau notamment tout apport d'engrais organique, d'origine humaine ou animale, tout épandage d'eaux usées, tout dépôt d'ordures ainsi que tout pâturage.

COMMENTAIRE :

La surface du périmètre sanitaire d'émergence est dans ce cas nettement supérieure à ce que peut exiger la réglementation. Ce choix a été fait par la DRIRE pour tenir compte de la vulnérabilité de la ressource captée et du fait qu'il n'y avait aucun autre moyen dans l'immédiat pour en assurer la protection. Dans ce cas précis, on peut considérer que le périmètre sanitaire d'émergence ainsi fixé, se substitue partiellement au périmètre de protection visé par les articles L736 et suivants du Code de la Santé Publique.

Exemple n° 2

ARTICLE 4 :

Le débit d'exploitation maximal autorisé du captage est de 8 m³/h.

ARTICLE 5 :

L'exploitation de l'eau minérale naturelle du captage se fait par un forage constitué de tubes concentriques dont les espaces annulaires sont entièrement cimentés.

Il est réalisé de la façon suivante :

- de 0 à 24 m : tubage acier de diamètre 273 mm.*
- de 0 à 171 m : un tubage en acier inox 316 L de diamètre extérieur 168,3 mm.*
- de 171 à 232 m : crépiné en acier inoxydable de même diamètre.*

Une cimentation a été réalisée gravitairement sur une ombrelle située à 169 m de profondeur dans l'espace annulaire constitué entre le trou de foration et le tubage de 168,2 mm de diamètre avec un ciment spécial qui isole la partie productive du forage vis-à-vis des nappes de surface.

Une pompe immergée est mise en place à une profondeur de 80 mètres.

Afin de permettre l'écoulement artésien du forage pendant la période d'arrêt des pompes, un piquage de 50,8 mm de diamètre est installé sur le tube d'exhaure qui comporte en outre une électrovanne asservie au fonctionnement de la pompe ainsi qu'un filtre bactérien à air destiné à contrôler les admissions d'air consécutives aux phases d'arrêt des pompes.

La tête du forage est équipée d'une sonde de mesure de rabattement, d'une vanne de réglage de débit, d'un manomètre ainsi qu'un robinet à prélèvement en acier inoxydable. Sont également disposés des capteurs de débit, de température, de pH et de conductivité dont les valeurs sont enregistrées en continu.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'urgence du captage se limite au local technique en béton de 6 x 4,5 mètres de côté entourant la tête du forage.

A l'intérieur de ce périmètre sont interdits tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau notamment tout apport d'engrais organique, d'origine humaine ou animale, tout épandage d'eaux usées, tout dépôt d'ordures ainsi que tout pâturage.

COMMENTAIRE :

La combinaison de l'hydrogéologie et de la conception du forage offrent a priori une protection satisfaisante, encore que la technique de cimentation (gravitaire) utilisée ne soit pas la plus efficace pour étancher un espace annulaire. On peut limiter le Périmètre Sanitaire au local technique destiné à assurer la sécurité physique du captage.

Certaines prescriptions assorties à ce périmètre sont dans ce cas "déraisonnables". Il est fortement recommandé de veiller à imposer des prescriptions cohérentes.

Exemple n° 3

ARTICLE 4 :

Le débit d'exploitation maximal autorisé du captage est de 7 m³/h.

ARTICLE 5 :

L'exploitation de l'eau minérale naturelle du captage se fait par un forage de 75 mètres de profondeur, tubé en PVC de 200 mm intérieur de 0 à 60 mètres, l'espace annulaire ayant été cimenté sous pression. Afin de capter les venues d'eau entre 68 et 71 mètres, une colonne de captage en tube PVC de 120 mm de diamètre intérieur est descendue de 60 à 75 mètres et crépinée sur 9 mètres de hauteur entre 65 et 74 mètres de profondeur. L'espace annulaire est rempli de graviers siliceux roulés.

Le niveau statique de la nappe se situe à 22,3 mètres de profondeur, la nappe demeurant, quant à elle, captive sous les argiles.

Les couches suivantes ont été rencontrées :

- de 0 à 20 m : sables, silts et argiles du Tertiaire,*
- de 20 à 59 m : argiles multicolores avec gypse et anhydrite du Trias,*
- de 59 à 65 m : argiles avec gypse et niveaux salifères,*
- de 65 à 66 m : niveau dolomitique compact,*
- de 66 à 69 m : argiles à niveaux de sel et gypse,*
- de 69 à 77 m : sel gemme compact du Trias.*

La tête du forage est abritée dans un abri maçonné de 1 mètre de côté sur 1 mètre de hauteur et muni d'un couvercle métallique.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'urgence du captage est formé par un carré centré sur la tête du forage, de 6 mètres de côté et matérialisé par une clôture grillagée de 2 mètres de hauteur avec un portail fermant à clef.

A l'intérieur de ce périmètre sont interdits tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau notamment tout apport d'engrais organique, d'origine humaine ou animale, tout épandage d'eaux usées, tout dépôt d'ordures ainsi que tout pâturage.

Le terrain appartenant à l'exploitant devra être protégé de fouilles éventuelles dans une zone de 300 mètres de rayon.

COMMENTAIRE :

Identique à l'exemple précédent ; à noter toutefois la dernière phrase qui paraît trop floue pour être applicable.

Exemple n° 4

ARTICLE 4 :

Le débit d'exploitation maximal autorisé du captage est de 10,5 m³/h.

ARTICLE 5 :

L'exploitation de l'eau minérale naturelle du captage se fait par un captage composé de deux tranchées profondes et convergentes en forme de V ouvert à 90° à partir du point dénommé "Griffon 1" jusqu'à la roche granitique (croquis en annexe).

Des drains sont placés dans ces ouvertures puis recouverts d'une chape imperméable de ciment afin d'éviter les infiltrations d'eau de ruissellement. Le drain droit est dénommé "Griffon 2" et la branche montante (dans le sens de la déclivité) ou drain gauche, "Griffon 3". Les griffons 2 et 3 sont reliés au griffon principal (Griffon 1) par l'intermédiaire d'un tuyau enterré en polyéthylène.

Deux fossés de garde ont par ailleurs été creusés à l'amont de l'ouvrage, afin d'évacuer l'eau de ruissellement en dehors de la zone de drainage.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'émergence du captage est constitué de six parcelles regroupées sous les n° 390 - 391 - 392 - 397 et 407, section AZ et d'une surface totale de 32 206 m² entièrement clôturée.

A l'intérieur de ce périmètre sont interdits tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau notamment tout apport d'engrais organique, d'origine humaine ou animale, tout épandage d'eaux usées, tout dépôt d'ordures ainsi que tout pâturage.

COMMENTAIRE :

Lors du renouvellement de la demande d'autorisation de ce captage ancien, n'excluant pas une certaine vulnérabilité, il a été décidé d'étendre le périmètre sanitaire bien au delà de la zone de captage. Il a donc pour objectif non seulement la protection de l'émergence, mais aussi d'une partie de l'aquifère (voir commentaire de l'exemple n° 1).

Exemple n° 5

ARTICLE 5 :

L'exploitation de l'eau minérale naturelle du captage se fait par un forage constitué de tubes concentriques dont les espaces annulaires sont entièrement cimentés. Les couches géologiques suivantes ont été rencontrées :

- de 0 à 5,2 m : limons argileux et graviers,
- de 5,2 à 22,40 m : marnes noires gréseuses et marno-calcaires à lignite,
- de 22,40 à 26 m : grès à ciment calcaire, marno-calcaire blanc,
- de 26 à 45,5 m : dolomies crayeuses blanches et marnes feuilletées (pyrites),
- de 45,5 à 63,5 m : calcaire oolithique, marnes, calcaire esquilleux,
- de 63,5 à 78 m : marnes noirs à lignite et calcaire dolomitique,
- de 78 à 85 m : marno-calcaire induré et marnes finement feuilletées,
- de 85 à 101 m : grès calcaire et calcaire massif esquilleux,

Le tubage est réalisé de la façon suivante :

- de 0 à 16 m : foration en diamètre 445 mm, avec tubage acier de 344 mm de diamètre intérieur de 0,20 à 14,80 m, avec cimentation de l'extrados,
- de 16 à 55,5 m : foration en diamètre 216 mm, alésé en diamètre 311 mm, tubage en acier inoxydable 316 L de 0,50 à 54,50 m, tubes de diamètre 226 mm intérieur vissés, avec cimentation annulaire,
- de 55,8 à 104 m : foration en diamètre 219 mm, avec tubage acier inoxydable de 179 mm de diamètre intérieur entre 49,65 et 99,40 m, crépine type Johnson en diamètre intérieur de 179 mm sur 31,75 m, avec tubes intercalés soudés sur 18 m.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'émergence immédiat du captage se compose des parcelles n° 475 à 479, 859 et d'une portion de zone non cadastrée sise entre le pont de et la parcelle n° 479.

A l'intérieur de ce périmètre sont interdits tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau notamment tout apport d'engrais organique, d'origine humaine ou animale, tout épandage d'eaux usées, tout dépôt d'ordures ainsi que tout pâturage.

COMMENTAIRE :

A noter le terme "périmètre sanitaire d'émergence immédiat" ; il s'agit là de l'influence d'un hydrogéologue agréé en matière d'eaux potables dont l'intervention n'était pas requise. L'emprise du périmètre est d'environ 2 Ha alors que compte-tenu de la géologie et de la conception du forage, un périmètre sanitaire, assurant la protection de la tête de captage aurait été suffisant (comme dans les exemples 2 et 3).

Dans son avis, l'hydrogéologue agréé complétait ce périmètre par un périmètre sanitaire d'émergence "périphérique" d'une emprise approximative de 15 Ha, situé de plus à cheval sur un cours d'eau important, et énonçait que le "périmètre sanitaire d'émergence réglementaire était constitué par l'ensemble des deux périmètres sanitaires d'émergence ainsi définis" ! Heureusement, cet avis n'a été repris dans l'arrêté !

Exemple n° 6

ARTICLE 5 :

L'exploitation de l'eau minérale naturelle du captage se fait par un forage profond de 41,95 mètres, implanté sous la rue principale traversant l'agglomération de La tête de ce forage est logée dans une cavité cimentée ayant 1,20 mètre de profondeur sous la route et dont l'accès se trouve condamné par une plaque en fonte amovible et rendu étanche par un joint en mastic. Le sol de cette cavité, tout autour du tube, est cimenté gras et comporte une évacuation en cas d'infiltration d'eau pluviale.

La tête du forage est en acier inoxydable avec collet en PVC pour le départ de la canalisation vers les thermes et se trouve munie d'un manomètre et d'un robinet à prélèvement également en acier inoxydable.

Le tubage est réalisé comme suit :

- de 0 à 30,26 mètres : tubage acier de 150 mm de diamètre avec l'espace annulaire entièrement cimenté,*
- de 30,26 à 41,95 mètres : trou nu de 75,3 mm de diamètre.*

La zone crépinée se situe entre la cote -20 et -25 mètres et une pompe immergée est installée dans le forage à la cote -24 mètres.

ARTICLE 6 :

Le périmètre sanitaire d'urgence du captage correspond à la cavité au sol où se trouve la tête de forage.

Pour assurer une bonne protection de l'eau du captage, les précautions suivantes doivent être prises, sous peine d'une révision de l'autorisation d'exploiter :

- interdiction de tous actes ou travaux de nature à compromettre la pureté de l'eau ;*
- impossibilité à tous véhicules de stationner sur, et à proximité, du captage ;*
- interdiction de manipuler des substances polluantes (hydrocarbures, pesticides, eaux usées, ...) sur, et à proximité, du captage ;*
- pose d'un système d'alerte pour signaler l'introduction d'eaux superficielles dans le captage ;*
- mesures d'hydrocarbures dans l'eau à effectuer soit, une avant ouverture de l'établissement, et tous les mois pendant la saison ;*
- vérification régulière de l'étanchéité du caniveau à proximité du captage ;*
- surveillance renforcée en cours de travaux sur la voirie à proximité du captage.*

COMMENTAIRE :

Il s'agit là d'un cas de force majeure se rencontrant parfois dans les stations thermales. La solution adoptée n'est pas idéale, mais assortie de prescriptions strictes.

A noter que le pétitionnaire est la commune, qui a pu instaurer les servitudes nécessaires pour assurer la sécurité au droit du périmètre sanitaire d'urgence propose.



Les techniques isotopiques : *application aux eaux minérales*

Note technique n° 7

Août 1996

R E S U M E

L'étude de la répartition des isotopes stables ou radioactifs de l'eau et des espèces qui y sont dissoutes, apporte des informations concernant l'origine de l'eau minérale, ou des éléments dissous, la durée du transit souterrain de cette eau (son âge) et permet dans certains cas de caractériser des processus dits secondaires, mais qui peuvent parfois contribuer de façon importante à l'originalité du faciès de cette eau.

Les méthodes d'application les plus courantes font appel au deutérium, à l'oxygène 18 et au tritium de la molécule d'eau, ainsi qu'aux isotopes du carbone des carbonates dissous.

Les autres méthodes sont relativement lourdes et ne sont mises en oeuvre que dans des cas bien précis.

SOMMAIRE

1. GENERALITES	1
1.1 Les isotopes de la molécule de l'eau	1
1.2 Les isotopes des espèces dissoutes	3
1.3 Application de ces méthodes aux eaux minérales	3
2. UTILISATION DES ISOTOPES DE LA MOLECULE DE L'EAU	4
2.1 Origine météorique des eaux minérales	4
2.2 Localisation de la zone d'alimentation	4
2.3 Le problème de l'effet paléoclimatique	5
2.4 Vérification des échanges avec l'encaissant	5
2.5 Datation de l'eau minérale par le tritium	6
2.6 Mise en évidence de mélanges à l'émergence	7
3. UTILISATION DES ISOTOPES DES ESPECES DISSOUTES	7
3.1 Origine du carbone minéral dissous	7
3.2 La datation de l'eau minérale par le carbone 14	9
3.3 Origine du soufre et activité bactérienne	9
3.4 La datation par le chlore 36	10
4. CONCLUSION	11
BIBLIOGRAPHIE	12

1 - GENERALITES

Toutes les méthodes dont il va être question ne sont ni plus ni moins que des méthodes de traçage par les isotopes du milieu naturel, donc par des isotopes dont les variations de teneurs dans les eaux naturelles sont (en principe) indépendantes de l'intervention humaine.

On distingue ainsi :

1.1 LES ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU

Parmi ceux-ci :

- l'oxygène 18 (^{18}O)
- le Deutérium (^2H)
- et le Tritium (^3H)

sont particulièrement utiles.

Elément	Isotope	Abondance naturelle moyenne %	Propriétés
Hydrogène	^1H	99,985	stable
	$^2\text{H} = \text{D}$ (Deutérium)	0,015	stable
	$^3\text{H} = \text{T}$ (Tritium)	10^{-18}	radioactif (période T = 12,43 ans)
Oxygène	^{16}O	99,76	stable
	^{17}O	0,04	stable
	^{18}O	0,20	stable

Tableau 1 : Isotopes du milieu de l'oxygène et de l'hydrogène : traceurs intimes de la molécule de l'eau.

Les deux premiers sont stables et présents en concentration significative ; l'atome de Tritium, lui, est rarissime à l'état naturel (cf tableau 1) ; il est produit naturellement dans la haute atmosphère par bombardement cosmique des atomes d'Azote ($^{14}\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^3_1\text{H}$).

Depuis 1952 (premier essai nucléaire d'Eniwetok), du Tritium d'origine artificielle a envahi la stratosphère, puis l'atmosphère et contribué à "ensemencer" les précipitations ; on en retrouve la trace dans les eaux souterraines.

NOTA : La tropopause, barrière qui sépare la stratosphère de l'atmosphère, présente au cours de l'année des discontinuités qui facilitent le "déstage" du tritium hors du réservoir stratosphérique vers l'atmosphère et donc vers les eaux.

Ces discontinuités se présentent de façon saisonnière. Le déstage est donc maximal au printemps et en été (pic de printemps qui correspond à 3 fois la teneur moyenne pondérée de l'année), et minimal en hiver ("vallée" d'hiver qui correspond à la moitié de cette même teneur).

Depuis l'accord sur l'arrêt des essais nucléaires aériens (après les essais de 1962/1963), le réservoir stratosphérique a commencé à s'épuiser en Tritium artificiel (Fig. 1). Cependant, le taux moyen de délestage, très élevé entre 1963 et 1970 (chute de moitié des teneurs tous les 15 mois environ), s'est ralenti par la suite, sous l'effet notamment de bouffées actives relâchées par les réacteurs nucléaires de plus en plus nombreux dans les zones industrialisées. Les activités dues au tritium artificiel ont été et, tout en s'amenuisant, sont bien souvent encore supérieures aux teneurs naturelles en tous points du globe.

Dosage du Tritium

Rarissime, le Tritium est heureusement instable (période 12,43 ans) et émetteur β (selon la réaction ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \beta^-$).

Cette radioactivité β , bien que faible (énergie maximale 18,1 KeV) est cependant détectable par spectrométrie à scintillation après préparation particulière des échantillons.

Les concentrations sont exprimées en unité Tritium (UT), qui exprime le rapport ${}^3\text{H}/{}^1\text{H}$:

Par définition 1UT = activité d'une eau qui contient 1 atome de ${}^3\text{H}$ pour 10^{18} atome de ${}^1\text{H}$.

Cela représente pour 1 litre d'eau dont la concentration est 1UT, une radioactivité de 0,118 Becquerel.

Dosage du Deutérium et de l'oxygène 18

Il se fait par spectrométrie de masse : on quantifie, les variations relatives des teneurs de ces isotopes par rapport à un échantillon étalon.

Dans le cas des eaux, l'étalon est constitué par le SMOW (Standard Mean Ocean Water), représentatif de la totalité de l'hydrosphère.

Les résultats sont exprimés en unité δ ou "part" pour mille :

$$\delta = \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{étalon}}}{R_{\text{étalon}}} \times 1000$$

avec

$$R = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \text{ ou } \frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}$$

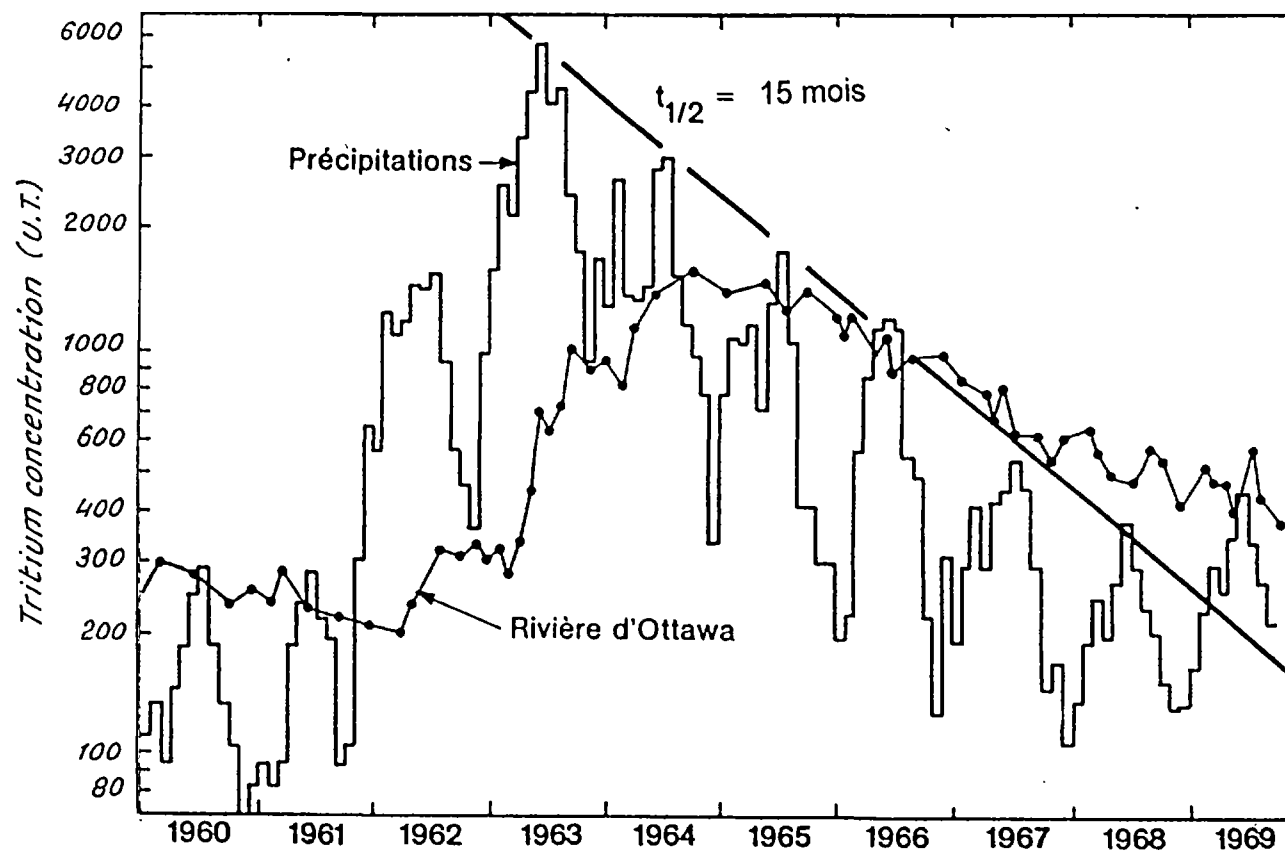


Fig. 1 - Evolution des teneurs en tritium des précipitations et des eaux de surface à Ottawa

1.2 LES ISOTOPES DES ESPÈCES DISSOUTES

Ce sont principalement les isotopes du carbone, du soufre, de l'azote et du chlore.

Les méthodes d'analyse mises en oeuvre sont celles déjà citées.

Elément	Isotope	Abondance naturelle moyenne %	Propriétés
Carbone	^{12}C	98,89	stable
	^{13}C	1,11	stable
	^{14}C	10^{-10}	radioactif ($T=5730$ ans)
Soufre	^{32}S	95,01	stable
	^{33}S	0,75	stable
	^{34}S	4,22	stable
	^{36}S	0,02	stable
Azote	^{14}N	99,634	stable
	^{15}N	0,366	stable
Chlore	^{35}Cl	75,53	stable
	^{36}Cl		radioactif ($T=3,04 \cdot 10^5$ ans)
	^{37}Cl	24,47	stable

1.3 APPLICATIONS DE CES MÉTHODES AUX EAUX MINÉRALES

Le tableau ci-dessous en résume l'essentiel.

Outil	Applications
^{18}O et ^2H de l'eau	nature et origine de l'eau température du réservoir altitude de l'aire d'alimentation mise en évidence de mélanges circuit hydrodynamique
^{34}S et ^{18}O des sulfates	nature du soufre et origine mise en évidence de mécanismes bactériens thermométrie isotopique oxydo-réduction du système
^{13}C du CITD *	origine et nature des composés carbonés mise en évidence de processus diagénétiques
^{14}C du CITD *	datation des eaux jusqu'à 45 000 ans estimation des vitesses de circulation dans un aquifère
^3H de l'eau	indicateur de temps de transit $^3\text{H}>1$ UT indique un apport post 1952 dans le système degré de vulnérabilité d'une nappe
^{36}Cl de l'eau	Datation de l'eau (en théorie) jusqu'à $3,10^6$ ans, âge du chlorure dissous

* CITD : Carbone Inorganique Total Dissous

2. UTILISATION DES ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU

2.1 - ORIGINE MÉTÉORIQUE DES EAUX MINÉRALES

NB : Dans la suite de cette note, de larges emprunts ont été faits à l'article de B. BLAVOUX (La Houille Blanche n° 2/3 - 1995).

“En considérant leurs teneurs en oxygène 18 et deutérium, on peut affirmer que toutes les eaux minérales françaises ont une origine météorique.”

- Tout d'abord parce que les eaux minérales à l'émergence présentent des teneurs en ^{18}O et ^2H toujours assez proches à la fois de la composition des eaux météoriques locales et de celle des sources banales de leur environnement. Le fait que les teneurs isotopiques des sources minérales suivent la variabilité régionale des pluies est un argument déterminant.
- Ensuite parce que toutes les eaux analysées se situent dans un diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - δD , sur la droite des eaux météoriques définie par Craig de pente sensiblement égale à 8 et d'ordonnée à l'origine ou excès en deutérium compris entre 10 et 14 (Fig. 2).

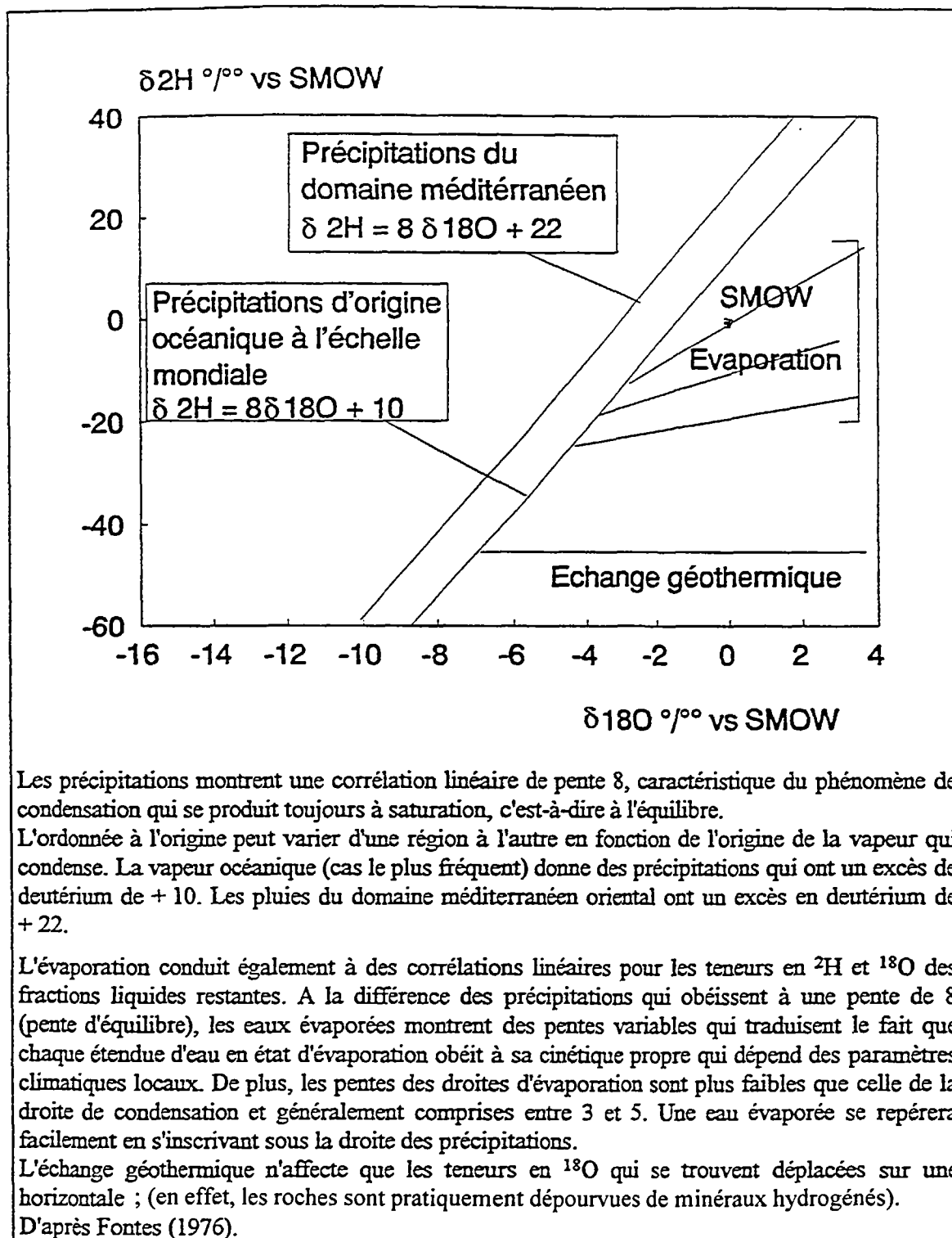
Par exemple, sur la Figure 3 où ont été reportées les teneurs de sources thermominérales du Sud-Est de la France, les points représentatifs sont tous très proches de la droite météorique et ce, dans un domaine très large de variations depuis des valeurs très négatives ($-100\ \delta\text{D}$ et $-13,8\delta^{18}\text{O}$) pour des sources situées dans les Alpes comme Monetier les Bains ou la Liche des Chamois comportant des zones de recharge à l'altitude moyenne de 2300 m jusqu'à des valeurs plus fortes de $-40\delta\text{D}$ et $-7\delta^{18}\text{O}$, à Jaujac en Ardèche avec zone d'alimentation à l'altitude de 450 m.

Si les eaux minérales étaient juvéniles, elles présenteraient des teneurs isotopiques sans doute homogènes et de toute façon très différentes de celles observées puisque l'on situe les concentrations de l'eau juvénile dans l'intervalle $+5$ à $+9\delta$ en ^{18}O et -80 à -40δ en ^2H .

2.2 LOCALISATION DE LA ZONE D'ALIMENTATION

“On concevra facilement, mais la théorie le prévoit et l'expérience le confirme, que les molécules “lourdes” sont moins volatiles que les espèces légères. Lors des changements de phase (condensation, évaporation) qui gouvernent les cycles de l'eau, les isotopes lourds se trouvent concentrés dans les phases condensées (eau, neige, glace). Les épisodes de condensations sont essentiellement liés aux refroidissements ; on peut donc s'attendre à la thermodépendance des compositions isotopiques de l'eau de condensation. A saturation, chaque abaissement de température entraîne une condensation partielle qui appauvrit le réservoir en isotopes lourds. A fraction condensée égale, toute nouvelle précipitation engendrée par un refroidissement montrera une concentration plus faible en oxygène 18 et en deutérium. Les teneurs isotopiques des eaux de pluie vont donc varier en fonction de l'altitude.

Il en résulte la possibilité de déterminer l'altitude moyenne de l'aire d'alimentation d'une source minérale en situant sa teneur isotopique moyenne sur une droite régionale isotope stable-altitude. Cette droite est construite à partir des teneurs des pluies ou de préférence de sources aux bassins versants bien connus sélectionnées à différentes altitudes.



**Fig. 2 : Résumé des modalités de traçage
par les isotopes stables de la molécule d'eau**

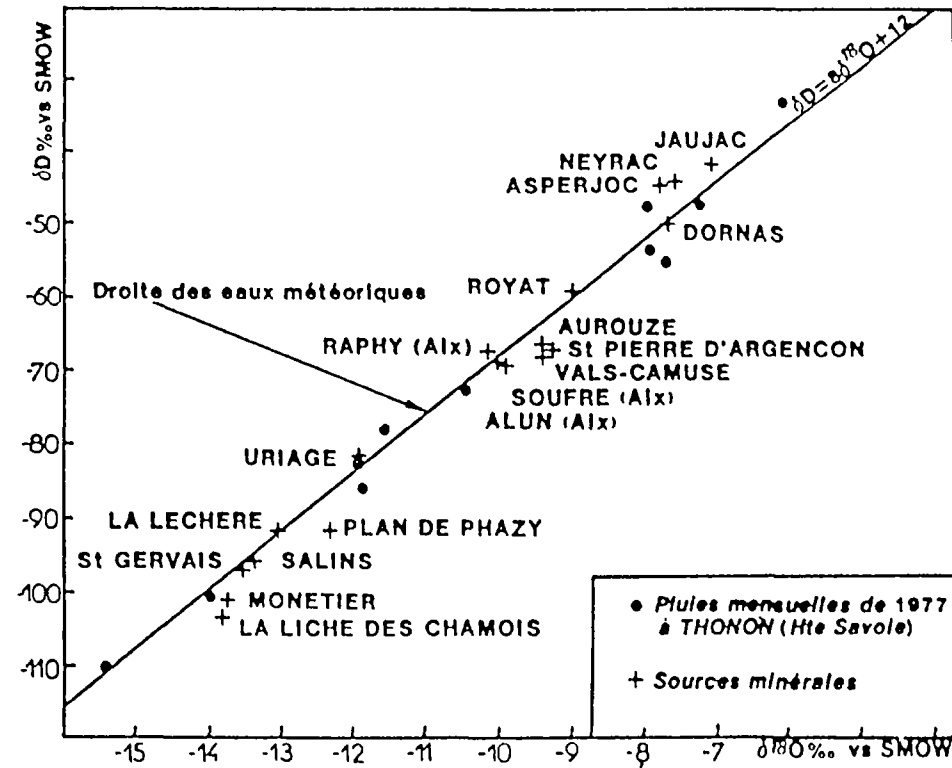


Fig. 3 - Variations des compositions isotopiques en Oxygène 18 et en Deutérium des sources minérales du Sud-Est de la France

Une des premières applications de ce type a été la localisation, sur le plateau de Gavot à 850 m d'altitude, de la zone d'alimentation des eaux minérales d'Evian à partir d'une étude fine de la variation des teneurs en ^{18}O des précipitations sur la rive sud du Léman.

A partir des teneurs en ^{18}O des sources échantillonnées à différentes altitudes sur le massif du Sancy (figure 4), les altitudes respectives de 1500 m pour l'impluvium des sources minérales du Mont-Dore et de 1200 m pour celles de la Bourboule ont été déterminées ce qui est compatible avec les structures géologiques de cette région volcanique.

Dans ce cas les gradients sont faibles, de l'ordre de $-0,16\delta$ en ^{18}O par 100 m d'élévation, valeur comparable à celle de $-0,15\delta$ trouvée entre 1200 et 2000 m dans les Pyrénées orientales probablement parce qu'une grande partie de la recharge provient de la neige et que l'effet d'altitude et de température sur la neige est négligeable. Ailleurs, ils sont généralement voisins de $0,22\delta$ mais cette variabilité des gradients de $0,15$ à $0,30\delta$ impose d'établir au cas par cas la droite de variation locale si l'on veut obtenir une bonne précision sur l'altitude de la zone d'alimentation du circuit hydrominéral.

2.3 LE PROBLÈME DE L'EFFET PALÉOCLIMATIQUE

La localisation de la zone d'alimentation doit être abordée avec circonspection si l'on estime avoir affaire à des eaux très vieilles. Il est possible en effet que des eaux minérales infiltrées lors d'une période plus froide que l'actuelle, comme la dernière période glaciaire, enregistrent un appauvrissement de leurs teneurs en isotopes lourds du à la baisse générale des températures, effet paléoclimatique qui se surajoute au seul effet de l'altitude.

Des études géochimiques, isotopiques et des datations menées sur des aquifères captifs des grands bassins sédimentaires français ont révélé la réalité de cet effet paléoclimatique; c'est ainsi que les sources minérales chaudes d'Eugénie-les-Bains et de Barbotan qui sont des exutoires de l'aquifère des sables sous-molassiques de l'Eocène du Bassin d'Aquitaine sont appauvries de $1,5\delta$ ^{18}O par rapport aux eaux actuelles qui s'infiltrent sur la zone d'alimentation constituée par leur affleurement. Il en est de même de l'eau du forage de Nancy thermal exploitée depuis l'aquifère des grès du Trias inférieur lorrain et appauvrie de $1,5\delta$ ^{18}O par rapport aux infiltrations actuelles sur leur affleurement dans le massif vosgien.

2.4 VÉRIFICATION DES ÉCHANGES AVEC L'ENCAISSANT

On doit envisager la possibilité qu'ont les eaux météoriques infiltrées très profondément et portées à des températures élevées d'échanger l'oxygène 18 de la molécule d'eau avec celui des silicates ou carbonates constituant le réservoir. Mais dans ce cas, le point représentatif de l'eau minérale sur un diagramme ^{18}O - ^2H ne se situe plus sur la droite des eaux météoriques mais en dessous (cf Fig. 2 : échange géothermique) puisqu'il y a eu enrichissement en ^{18}O au contact de la roche dont les teneurs sont fortes ($+5$ à $+10\delta$ en ^{18}O) sans que les teneurs en ^2H n'en soient affectées, le réservoir étant pratiquement dépourvu en minéraux hydrogénés.

Ce phénomène de déplacement a été observé sur les champs géothermiques mais n'a pas été mis en évidence sur les sources minérales françaises à l'exception peut-être de la région de Coren-les-Eaux dans le Cantal. Nous pensons que cet échange n'est effectif qu'à partir d'une température profonde de 250°C dans le meilleur des cas, et dépend aussi de la nature de la roche encaissante, de son état d'altération et des paramètres hydrauliques commandant le temps de séjour de l'eau.

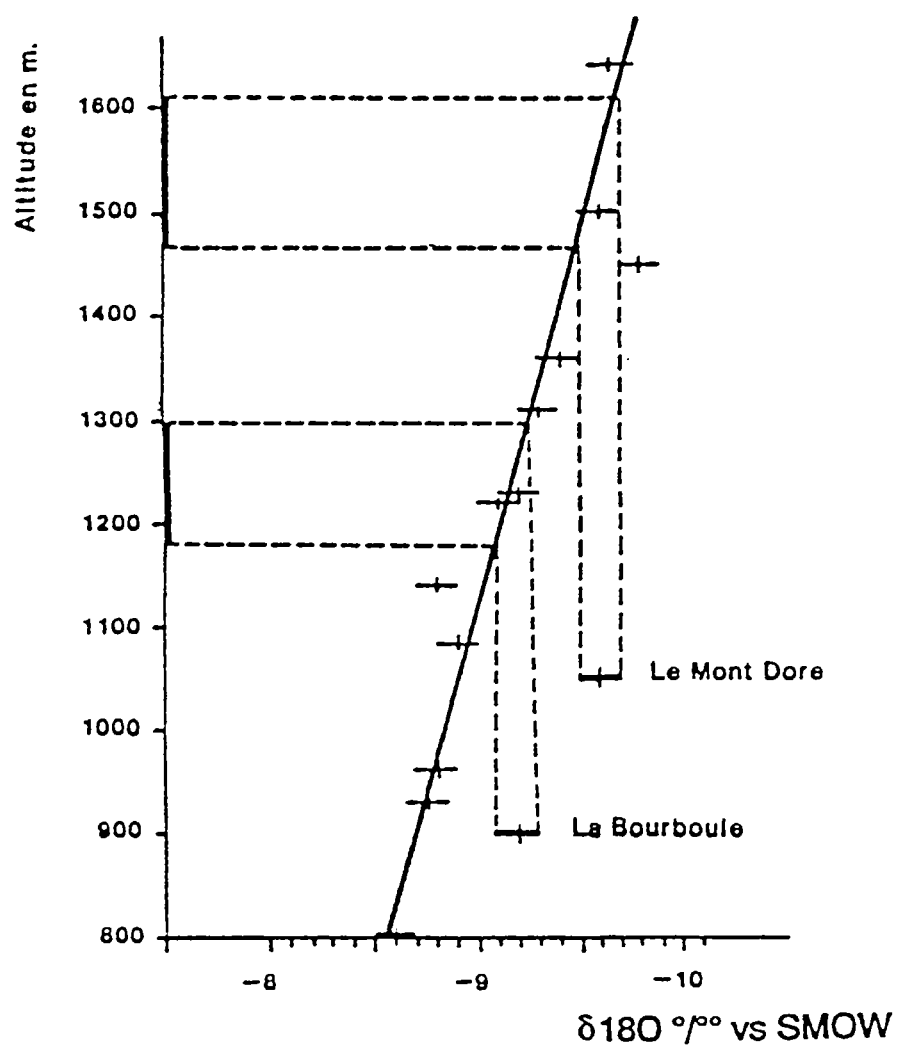


Fig. 4 - Relation teneur en 18 Oxygène / altitude du bassin d'alimentation (sources du massif du Sancy)

2.5 DATATION DE L'EAU MINÉRALE PAR LE TRITIUM

La production artificielle de tritium depuis les années 1950, permet de différencier les eaux minérales qui résultent de précipitations sans ^3H nucléaire d'avant 1952, de celles résultant de précipitations formées dans une atmosphère contenant du ^3H nucléaire, postérieurement à cette date.

Le seuil de différenciation se situe actuellement à 2 U.T. qui est le seuil de mesure en routine du tritium même si le seuil véritable est encore plus bas puisque la teneur en ^3H des pluies avant 1952 étant de 5 U.T., il n'en subsiste, 42 ans après, pas plus que 0,5 U.T. compte tenu de la décroissance radioactive. Les contrôles effectués sur de nombreuses eaux minérales françaises indiquent très souvent des eaux anciennes antérieures à 1952.

Pour les eaux minérales contenant du tritium, il est difficile d'estimer l'âge de l'eau si l'on ne dispose pas d'une série d'analyses permettant de dégager une évolution des teneurs sur de nombreuses années. Par exemple l'eau minérale d'Evian ne contenait pas de tritium en 1963. La poursuite des mesures jusqu'à ce jour a permis d'observer les faits suivants :

- apparition d'un premier pic en 1964/1965 qui est interprété comme l'arrivée d'une eau majoritairement ancienne avec environ 3% d'eau contemporaine (les aquifères libres contenaient à l'époque 700 UT) ; ce sont les infiltrations de la partie basse du bassin d'Evian ;
- apparition d'un pic majeur, mais amorti, en 1979, en réponse à l'impulsion majeure de l'année 1963 ; le temps de filtration est donc au moins égal à 16 ans (Fig. 5) ;
- toutefois, le grand amortissement de cette impulsion permet d'envisager un temps de séjour plus élevé de l'ordre de 50 ans.

Le choix entre ces deux interprétations est conditionné par les hypothèses adoptées concernant le mécanisme de transfert de l'eau minérale dans l'aquifère (transfert de type piston ou de type mélange).

A défaut de longues chroniques, on peut actuellement retenir la "recette" suivante :

- si la teneur de l'eau minérale dépasse 25 U.T., son âge moyen est de quelques dizaines d'années parce qu'elle est marquée par les fortes teneurs des pluies du pic de 1963.
- si la teneur est comprise entre 10 et 25 U.T., il s'agit généralement d'une eau infiltrée durant la dernière décennie mais il peut aussi s'agir d'une eau post nucléaire se mélangeant pour partie avec une eau ancienne.
- si la teneur est comprise entre 2 et 10 U.T., il s'agit d'un apport d'eau post nucléaire dans une eau ancienne.

NOTA : Ces interprétations supposent que l'on ait par ailleurs (sur la base de considération liée à la géochimie des sources) des idées précises sur la représentativité des eaux considérées (échantillon correspondant à de l'eau profonde non mélangée, à un mélange naturel de plusieurs types d'eaux).

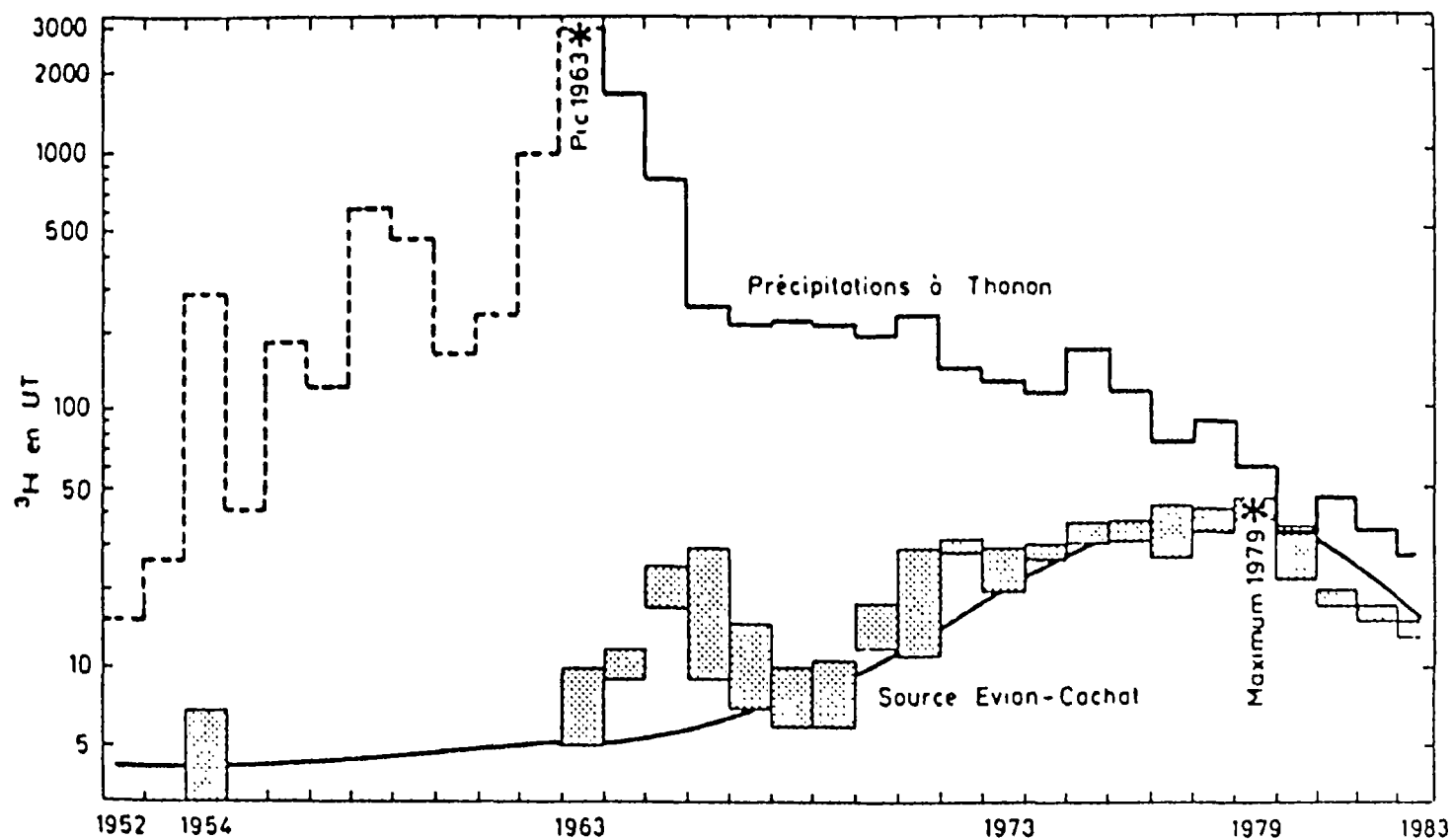


Fig. 5 - Evolution des teneurs en tritium dans les précipitations et la source minérale d'Evian-Cachat

On en déduit ainsi une limitation de cette méthode : elle ne peut être utilisée valablement qu'en appoint, pour étayer des interprétations déjà esquissées sur d'autres critères (chimie des eaux).

2.6 MISE EN ÉVIDENCE DES MÉLANGES À L'ÉMERGENCE

L'eau minérale peut difficilement rejoindre la surface sans être affectée par un mélange avec des eaux superficielles. Ainsi, on observe généralement dans la zone d'émergence plusieurs sources correspondant à des mélanges en proportions différentes mais appartenant toutefois à la même lignée géochimique.

Pour étudier ces mélanges généralement binaires, il est usuel d'examiner les relations de chaque élément de la minéralisation de tous les points d'eau avec l'élément conservatif le plus représentatif des eaux profondes comme les chlorures, le sodium ou les sulfates suivant les cas.

Si le contexte le permet, les isotopes de l'eau, puisqu'ils font partie intégrante de la molécule, restent les meilleurs marqueurs de ce mélange. C'est ainsi qu'il est souvent possible de distinguer dans une aire d'émergence, la (ou les) source principale, exempte de tritium parce qu'ancienne, des sources secondaires affectées d'un mélange avec des eaux plus récentes, marquées par quelques unités Tritium, proportionnellement à l'importance du mélange.

On a démontré également à l'aide des isotopes stables que l'eau minérale de Badoit (Saint Galmier) est la résultante d'un mélange entre une composante profonde gazeuse, très minéralisée et appauvrie en oxygène 18 et une composante du granit à moyenne profondeur qui se distingue cependant des aquifères de la plaine du Forez. Ce marquage résulte du fait que le circuit profond a une aire d'alimentation sur les monts du Forez à une altitude plus élevée que le circuit à moyenne profondeur sur les monts du Lyonnais et (ou) un temps de séjour très grand entraînant un effet paléoclimatique.

3. UTILISATION DES ISOTOPES DES ESPECES DISSOUTES

3.1 ORIGINE DU CARBONE MINÉRAL DISSOUS

Les rapports des isotopes stables $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sont exprimés en ‰ C par rapport à un étalon de référence (P.D.B.), une bélemnite de la Pee Dee formation du Crétacé de Caroline du Sud. Les $\delta^{13}\text{C}$ du carbone minéral dissous, bicarbonates (HCO_3^-) et gaz (CO_2) permettent quand ils sont employés avec précaution de retracer l'origine du carbone.

Le problème est particulièrement d'acuité pour les sources minérales à dégagement gazeux.

La minéralisation carbonatée d'une eau souterraine s'acquiert communément par dissolution, d'une part du CO_2 du sol résultant de la décomposition par les micro-organismes de la matière organique du sol, d'autre part des carbonates du sol et des roches en contact avec l'eau. La matière organique a une composition isotopique de -27 ± 5 et le CO_2 biogénique légèrement enrichi une valeur moyenne de -24δ . La matrice calcaire des sédiments marins a une teneur isotopique moyenne de $0\pm 2\delta^{13}\text{C}$.

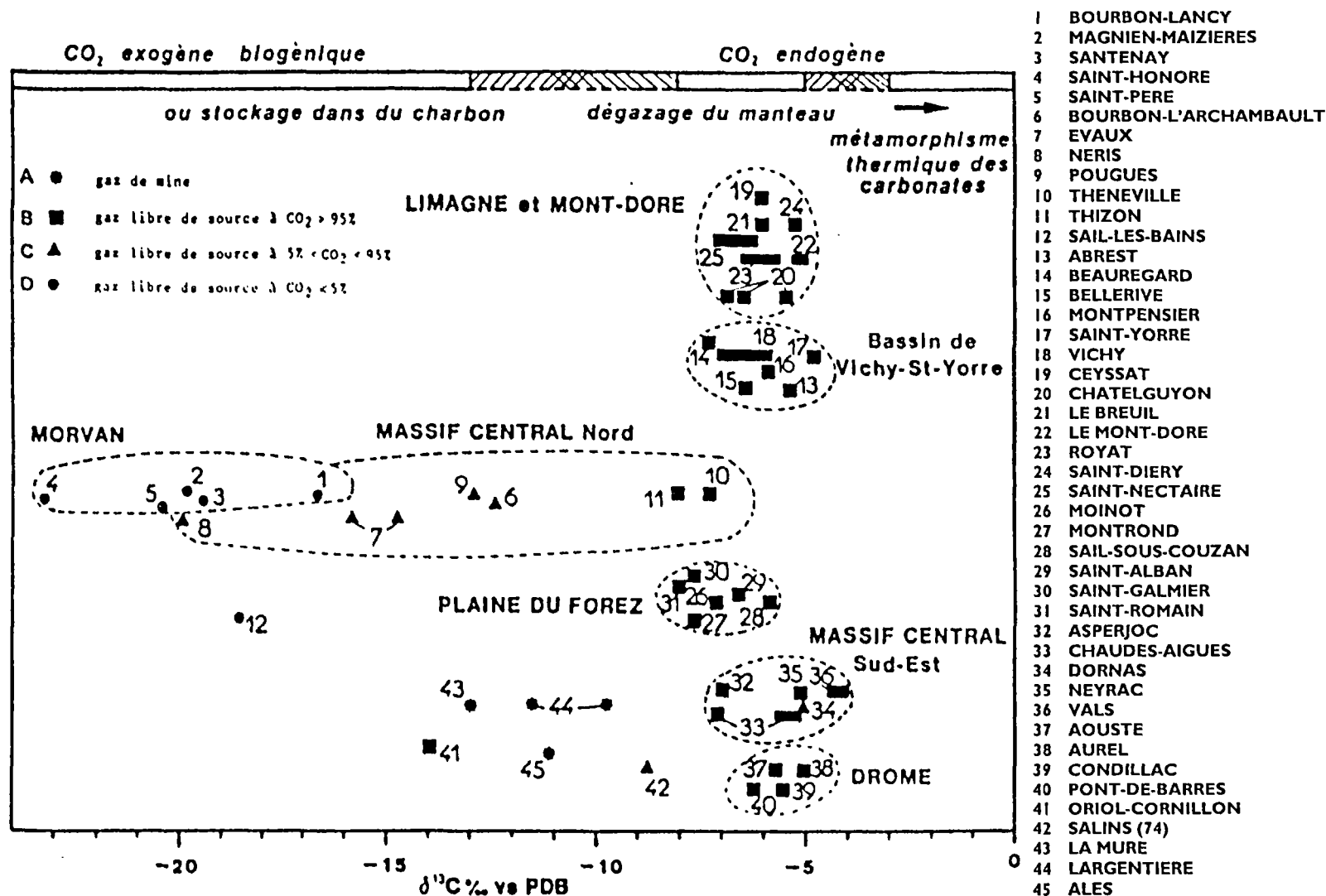
Si la mise en solution des carbonates s'effectue sans fractionnement, il n'en est pas de même de la mise en solution du CO_2 , toutefois peu fractionnante ($-0,1,1\delta$ à 25°C) et surtout de sa dissociation en bicarbonates qui enrichit les bicarbonates de $+8\delta^{13}\text{C}$ par rapport au CO_2 ambiant. Ainsi le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone minéral dissous d'une eau souterraine dépend, à l'infiltration en milieu ouvert, des proportions de CO_2 dissous et de bicarbonates donc de la pression partielle de CO_2 et du pH. Il évolue dans l'aquifère en milieu fermé en fonction de l'état de saturation de l'eau vis-à-vis des carbonates du réservoir. Les $\delta^{13}\text{C}$ du carbone minéral sont dans les conditions normales compris entre -18δ dans le sol et -12δ à saturation. La précipitation éventuelle de calcite appauvrit légèrement par effet de bilan le carbone minéral dissous car elle est enrichie d'environ 2δ .

Dans des conditions plus exceptionnelles, qui peuvent être celles des circuits très profonds, la production de CO_2 in situ est plus perturbatrice :

- La fermentation méthanique dans des milieux très réducteurs entraîne un fractionnement isotopique considérable de l'ordre de 50δ entre le CH_4 appauvri (par exemple $\delta^{13}\text{C} = -50\delta$) et le CO_2 enrichi (0δ) transformés à parts égales de la matière organique (-25δ). L'eau rendue agressive par ce dégagement de CO_2 retourne à saturation par dissolution de carbonate. L'effet conjugué d'un apport de CO_2 plus riche en ^{13}C et d'une nouvelle mise en solution de calcite enrichit le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone minéral dissous. Des valeurs de -5δ sont couramment atteintes.
- L'arrivée par les grands accidents du socle de CO_2 magmatique avec un $\delta^{13}\text{C}$ voisin de -5δ provoque de la même façon un enrichissement en ^{13}C du carbone minéral dissous. Mais les conséquences en sont généralement plus spectaculaires car ces dégagements de CO_2 extrêmement abondants arrivent à masquer complètement la minéralisation initiale de la zone d'infiltration en imposant leur marquage à l'eau minérale carbogazeuse compte tenu des conditions de pression et de pression partielle de CO_2 en profondeur.

Une application sur l'origine du carbone a été menée à partir d'un inventaire des analyses isotopiques effectuées sur le CO_2 des gaz associés aux sources minérales françaises. Leurs $\delta^{13}\text{C}$ sont rassemblés sur la figure 6 avec des indications sur leur provenance et la composition du dégagement gazeux.

- Pour les sources carbogazeuses typiques dont le CO_2 constitue l'essentiel de la phase gazeuse en dépassant généralement 95 pour cent, la composition isotopique du carbone 13 du CO_2 libre est très regroupée autour de la valeur $-6\delta \pm 2$ et est comparable à celle du carbone des gaz volcaniques directement libérés du magma. Le CO_2 a donc une origine endogène et résulte de phénomènes géologiques profonds comme le dégazage du manteau.
- Pour les sources à dégagement gazeux où prédomine l'azote (Pyrénées), en dépassant souvent 90 pour cent, le CO_2 a une composition isotopique qui varie de -12 à $-20\delta^{13}\text{C}$ et indique une origine biogénique pour le carbone. Cette origine exogène est confirmée par les teneurs en azote et en argon assez voisines de celles de l'atmosphère. Ces gaz sont donc véhiculés par des eaux de pluie infiltrées profondément qui remontent à la surface à la faveur de failles.


Fig. 6 - Teneurs en 13C et origine du CO₂ libre des sources minérales

- On n'a pas retrouvé en France de teneurs isotopiques du CO₂ appartenant au domaine des carbonates marins et indiquant clairement la décomposition des calcaires à haute température (thermodécarbonatation).

Cette application porte sur le gaz CO₂ se dégageant d'un griffon d'eau minérale ou sur la tête d'un forage. Il conviendrait en toute rigueur d'établir la teneur en ¹³C du carbone minéral total dissous en profondeur, avant le point de bulle de l'eau carbogazeuse entraînant le départ de CO₂ dissous appauvri par rapport aux bicarbonates et par effet de bilan dans un système non réapprovisionné un enrichissement du carbone minéral dissous restant. De telles vérifications sont en cours sur des forages d'exploitation profonds équipés pour de tel prélèvements.

3.2 LA DATATION DE L'EAU MINÉRALE PAR LE CARBONE 14

En l'absence de tritium, la datation par le radiocarbone peut être tentée. La période de demi-vie du carbone 14 est de 5.730 ans. La mise en oeuvre de cette méthode implique d'abord une détermination du carbone 13 pour préciser le mode d'introduction du carbone dans l'eau ; le ¹⁴C permet ensuite théoriquement, par sa décroissance radioactive de déterminer l'époque à partir de laquelle le composé carbonaté étudié a pu s'isoler de l'atmosphère.

Dans la pratique, on est obligé de recourir à de nombreuses hypothèses qui peuvent constituer des limitations sérieuses à la validité des interprétations réalisées ; par ailleurs cette méthode oblige à déterminer au préalable les informations suivantes :

- analyse chimique (éléments majeurs) ;
- paramètres physico-chimiques mesurés in situ (température pH, alcalinité et éventuellement potentiel redox) ;
- teneurs en carbone 13 du carbone inorganique total dissous, des carbonates de l'aquifère, et du CO₂ du sol de la zone d'alimentation.

Quelques datations ont été obtenues sur les eaux minérales sulfurées sodiques, dans les Pyrénées à Cauterêts (5.100 ans sur le groupe nord) et à Luchon (14.000 ans), en Corse à Guagno-les-Bains (6.000 ans) qui confirment les vitesses d'écoulement extrêmement lentes des eaux dans la profondeur des massifs de granite.

En milieu sédimentaire les temps de séjour peuvent aussi être très élevés et ont été estimés par exemple pour les eaux minérales chaudes issues des sables sous-molassiques d'Aquitaine enregistrant un marquage paléoclimatique (cf 2.3) à 29.500 ans à Eugénie-les-Bains et 20.000 ans à Barbotan.

On doit hélas renoncer à la datation par le carbone 14 des eaux minérales carbogazeuses dont la minéralisation carbonatée est héritée en quasi totalité d'un CO₂ profond magmatique et de carbonates sédimentaires ou hydrothermaux à carbone 14 "mort".

3.3 ORIGINE DU SOUFRE ET ACTIVITÉ BACTÉRIENNE

Les isotopes utilisés sont les isotopes stables les plus abondants de l'atome de soufre, ^{32}S banal (95,02%) et ^{34}S (4,21 %). Pour le rapport $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ l'étalon de référence est la troïlite (FeS) de la météorite de Canyon Diablo aux Etats Unis (CDT). L'étude isotopique du soufre peut renseigner sur l'origine des espèces dissoutes et rend possible l'identification des processus géochimiques et biochimiques qui les affectent. Quand il s'agit de sulfates, les études sont facilitées si l'on dispose aussi de la composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$).

Ces études sont souvent assez lourdes, et ne peuvent être menées que sur des sites déjà relativement bien étudiés par ailleurs.

Grossièrement, les résultats disponibles sur quelques eaux minérales françaises permettent de distinguer isotopiquement 2 groupes :

- celui des fortes valeurs, à sulfates dérivant des évaporites, dont les $\delta^{34}\text{S}$ sont assez regroupés entre +15 et +20 comme par exemple à Vittel ($+16\delta \pm 0,5$) ou pour les sources chaudes du Briançonnais à l'Ouest du front de chevauchement ($+16\delta \pm 1$).
- celui des sulfates relativement appauvris dérivant de l'oxydation des sulfures métalliques dont les teneurs isotopiques sont habituellement inférieures à +11 δ , particulièrement pour les eaux ayant circulé dans les granitoïdes, par exemple dans les Vosges à Plombières (+10,7 δ et +11,8 δ), dans les Pyrénées Orientales à la Preste (+6,5 δ) ou dans le Massif Central pour la source Badoit à Saint Galmier (+6,4 δ) et à Royat (+11 δ).

Cependant, cette distinction n'est plus valable s'il s'agit d'une eau sulfurée dans laquelle sont présents sulfures et sulfates témoignant de phénomènes d'oxydo-réduction. En effet, la réduction bactérienne du sulfate dissous enrichit le sulfate résiduel en isotopes lourds et les produits réduits sont appauvris. Le fractionnement instantané est alors important contrairement aux réactions précédentes et une valeur de 1,040 est communément admise dans le cas d'une réduction par les bactéries *Désulfovibrio desulfuricans*. Le fractionnement apparent qui en résulte entre sulfates et sulfures est une fonction exponentielle de la fraction restante du sulfate réactant. Il témoignent en quelque sorte de l'ampleur de l'activité bactérienne. La réduction du sulfate est par ailleurs marquée sur un diagramme ^{34}S - ^{18}O par une droite de pente moyenne égale à 4 entre le sulfate initial et le sulfate résiduel.

Une étude isotopique du soufre dans les eaux thermoninérales des Landes indique un fractionnement résultant entre sulfates enrichis et sulfures, voisin de 23 δ , comparable à celui d'autres sources sulfurées françaises (Allevard, Enghien-les-Bains, Puzoschello).

Ce fractionnement est plus faible que celui connu pour les eaux géothermales du Dogger du Bassin Parisien qui atteint jusqu'à 45 δ dans un milieu réducteur sans doute plus confiné.

Dans le cas des Landes, l'étude isotopique des formes du soufre permet d'apprécier l'ampleur de la réduction bactérienne à partir d'une minéralisation sulfatée acquise au contact des diapires triasiques. Les fortes valeurs du $\delta^{34}\text{S}$ (de l'ordre de +25 δ) attestent de l'existence d'une réduction même quand les sulfures ne sont plus présents à l'émergence par suite d'une complète réoxydation comme à Dax.

3.4 LA DATATION PAR LE CHLORE 36

Les chlorures sont presque toujours présents dans les eaux minérales naturelles, et ne sont que rarement impliqués dans les interactions eaux rochers.

Le chlore 36, d'une période de 300 000 ans est un traceur de temps particulièrement bien adapté à l'étude des eaux souterraines anciennes.

Toutefois, cette méthode relativement lourde, n'est encore que peu utilisée.

4. CONCLUSION

L'étude d'un échantillon d'eau, peut apporter des informations d'une richesse étonnante, en portant à la fois sur les espèces dissoutes dans l'eau, et sur l'eau elle-même.

Les outils isotopiques constituent à ce titre des méthodes de traçage particulièrement précieuses, notamment les techniques les plus anciennes et les mieux développées faisant appel aux isotopes de l'oxygène, de l'hydrogène et éventuellement du carbone ; elles apportent des réponses fiables aux différentes questions que l'on est amené à se poser quand on cherche à préciser le gisement de l'eau minérale.

BIBLIOGRAPHIE

- ☞ FONTES J.Ch. (1976) Les Isotopes du milieu dans les eaux naturelles - La Houille Blanche 3/4 - 205-221
- ☞ ROTH E. POTY B. (1985) Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels - Applications - Collection CEA - Masson
- ☞ CRAIG H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters - Science 133 1702 1703
- ☞ BLAVOUX B (1995) Apport des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale - La Houille Blanche 2/3 1995
- ☞ CHERY L, EBERSCHWEILER C. (1994) Conseils pratiques pour la réalisation d'une étude isotopique dans le domaine de l'eau - BRGM R38126



Représentations graphiques des résultats d'analyses eau minérale

Note technique n° 8

Août 1996

R E S U M E

Les nombreuses données physico-chimiques, utiles à la caractérisation d'une source d'eau minérale, induisent l'utilisation de représentations graphiques.

L'objectif principal d'une représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux minérales de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.

Les trois graphiques, Schoeller-Berkaloff, Piper et diagramme à coordonnées rayonnantes, sont les représentations des concentrations en ions majeurs les plus courantes. Chacune de ces représentations a ses avantages et ses inconvénients, et il convient de rester critique vis à vis de l'interprétation qui en est faite, selon que l'on cherche à caractériser un faciès particulier, à comparer différentes eaux entre elles, ou à mettre en évidence la stabilité d'une eau dans le temps.

Les points essentiels à retenir sont précisés sur le tableau ci-après :

DIAGRAMME	POINTS ESSENTIELS
Schoeller Berkaloff	➤ Bien adapté à la comparaison d'échantillons de faciès identique mais différents par leur degré de dilution. ➤ Risque d'interprétation abusive de la conformité de 2 échantillons du fait des reports graphiques sur échelle logarithmique.
Piper	➤ Bien adapté pour l'étude comparative d'un nombre important d'échantillons. ➤ Risque d'erreur dans la comparaison d'échantillon du fait d'une représentation en % des ions.
Coordonnées rayonnantes	➤ Adopté par le Ministère de la Santé pour l'identification du faciès physico-chimique et la comparaison entre une analyse de référence et un échantillon donné. ➤ Difficulté de comparer plus de 2 échantillons à la fois. Mal adapté à des études concernant de nombreux échantillons.

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION	1
2. LES REPRESENTATIONS GRAPHIQUES LES PLUS COURANTES	1
2.1 Diagramme de Schoeller Berkaloff	1
2.2 Diagramme de Piper	3
2.3 Diagramme à coordonnées rayonnantes	5
3. MODALITES D'UTILISATION DES GRAPHIQUES	6
3.1 Identification des facies physico-chimiques	6
3.2 Contrôle de la stabilité d'une eau minérale	8
3.3 Représentations graphiques spécifiques	12
4. CONCLUSION	12
BIBLIOGRAPHIE	14

FIGURES

1.	Exemple de diagramme de Schoeller Berkaloff	2
2.	Exemples de résultats analytiques sur le diagramme de Piper	4
3.	Exemple de diagramme à coordonnées rayonnantes	7
4. et 4bis.	Exemples de facies physico-chimiques distincts	9 et 10
5.	Graphiques spécifiques : exemple de classement des sources d'un gisement	13

1. INTRODUCTION

La caractérisation d'une ressource en eau minérale requiert l'obtention de données physico-chimiques diverses obtenues à partir des analyses d'échantillons prélevés à différentes époques pour une même émergence, ou en différents lieux pour plusieurs émergences situées dans un même gisement.

La nécessité de permettre une comparaison aisée et une classification des eaux minérales, selon la composition des divers échantillons analysés, a induit l'utilisation de représentations graphiques.

La présente note technique a pour objectif de sensibiliser le lecteur aux représentations graphiques les plus couramment utilisées dans les dossiers d'autorisation présentés par les exploitants. Une attention particulière est en outre portée sur le diagramme à coordonnées rayonnantes que le Ministère de la Santé utilise généralement pour présenter l'analyse de référence dans le cadre d'une procédure d'autorisation (bulletin de l'Académie Nationale de médecine).

2. LES REPRESENTATIONS GRAPHIQUES LES PLUS COURANTES

2.1 LE DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF (cf Fig. 1 - page 2)

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun de ces ions (ou des groupements Na+K et CO₃+HCO₃) la teneur réelle en mg/l est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique obtenu permet de visualiser le facies de l'eau minérale concernée (cf Fig. 1 - page 2)

NOTA : - Le diagramme utilisé permet une lecture directe des concentrations en mg/l des différents ions majeurs, sans conversion en % relatif (cf diagramme de Piper). En outre, les 2 axes des ordonnées, situés à droite et à gauche du graphique, permettent une conversion directe en milli-équivalent¹. Ces deux modes de représentation facilitent à la fois la construction des graphiques et la lecture des données.

¹ Le milliéquivalent est défini comme le rapport de la concentration en mg/l d'un ion donné à son équivalent chimique A/N avec A = masse atomique et N = valence de l'ion.

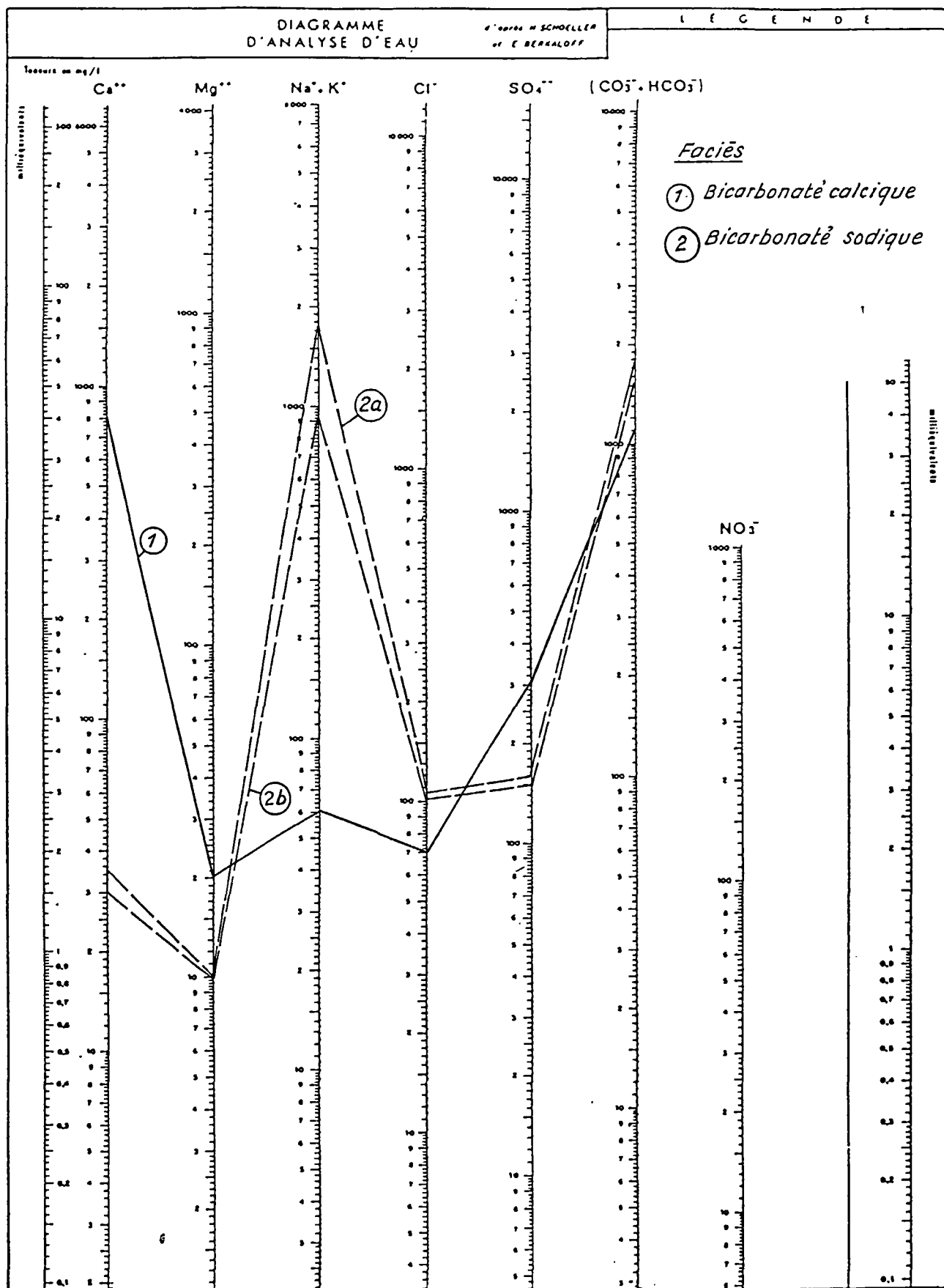


Fig. 1 - Exemple de diagramme de Schoeller-Berkaloff

- Le diagramme de Schoeller Berkaloff permet la représentation de plusieurs analyses sur le même graphique. Il y a superposition des droites obtenues si les concentrations sont identiques et décalage relatif des droites les unes au dessus des autres dans le cas contraire (cf teneurs en Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- des échantillons 2.a et 2.b sur la figure 1 page 2).
- Toute droite réunissant deux éléments A et B d'une même eau et parallèle à une autre droite réunissant les mêmes éléments A' et B' d'une autre eau, indique un même rapport des éléments : $A/B = A'/B'$. Ces graphiques permettent également, d'après l'inclinaison des traits, de voir les rapports des éléments entre eux et en particulier des rapports souvent considérés comme caractéristiques ou d'importance marquée : Na^+/Ca^+ , $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$...
- Un inconvénient du diagramme de Schoeller Berkaloff réside dans le fait que la comparaison de deux eaux peut amener à considérer que les facies physico-chimiques sont similaires alors que les écarts de concentrations relatives en un ou plusieurs éléments sont significatifs. Sur l'exemple de la figure 1- page 2 les deux échantillons 2a et 2b présentent le même facies et peuvent justifier l'appartenance à un même contexte hydrogéologique, cependant dans l'analyse de détail, on notera que la différence de concentration en $\text{Na} + \text{K}$ est de l'ordre du simple au double (effet de l'échelle logarithmique). Il convient donc de garder un esprit critique qui, pour le cas présenté, peut par exemple orienter la réflexion sur l'influence de la profondeur des niveaux captés : l'échantillon 2a capté plus en profondeur que 2b est très probablement soumis à des interférences plus faibles d'eaux superficielles moins minéralisées. Dans d'autres cas, une augmentation de concentration d'un élément pourra marquer un échantillon prélevé à faible profondeur du fait de circulation plus importante ayant induit des dissolutions. On note par ces remarques, l'importance d'analyser un dossier non seulement à partir des seuls analyses mais également à partir du système hydrogéologique dans son ensemble (intégrant le mode de réalisation du forage et les conditions de pompage).

2.2 LE DIAGRAMME DE PIPER (cf Fig. 2 - page 4)

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite).

La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique.

A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le facies de l'eau minérale concernée :

- ① Bicarbonatée calcique
- ② Bicarbonatée magnésienne
- ③ Bicarbonatée sodique

- ④ Sulfatée calcique
- ⑤ Chlorurée sodique

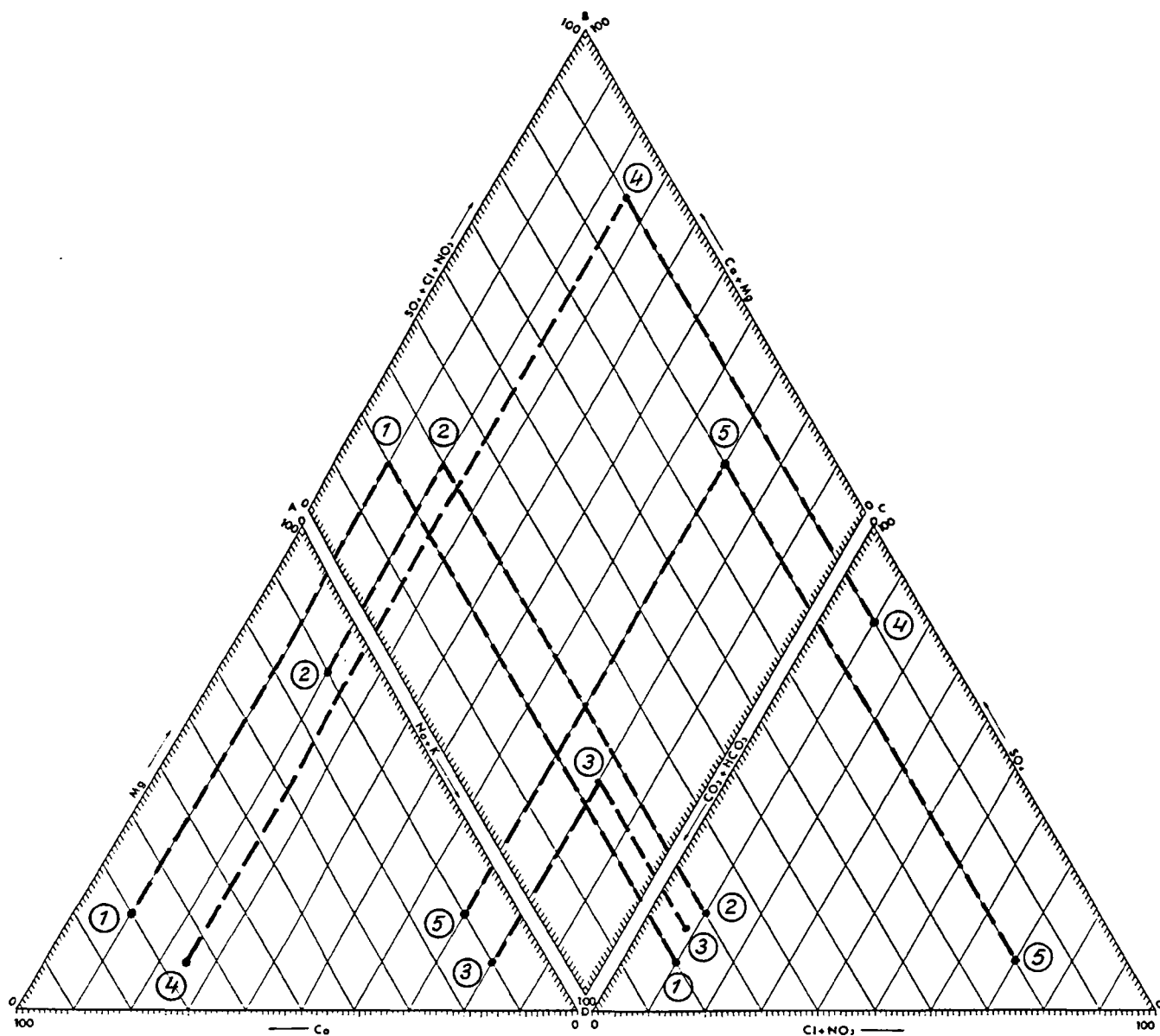


Fig. 2 - Exemple de résultats analytiques sur le diagramme de Piper

- sommet du losange = facies sulfaté/chloruré, calcique/magnésien,
- base du losange = facies bicarbonaté, sodique,
- pointe droite du losange = facies sulfaté/chloruré, sodique,
- pointe gauche du losange = facies bicarbonaté, calcique/magnésien.

- NOTA :**
- Le problème majeur pour ce type de représentation vient du fait que les analyses sont reportées sous forme de pourcentage, ainsi l'effet de dilution (variation de la concentration absolue) n'est pas immédiatement perceptible. Il convient d'être prudent dans la comparaison des qualités physico-chimiques de deux échantillons distincts.
 - Un avantage du diagramme de Piper est qu'il permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des facies similaires. Ce point peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre du suivi qualité d'une eau minérale dans le temps, pour lequel on dispose de plusieurs analyses physico-chimiques, ou dans le cadre d'études régionales de comparaison de divers points.
 - Le diagramme de Piper est également intéressant pour juger de l'importance relative des précipitations ou dissolution d'éléments majeurs entre deux analyses (voire un nombre supérieur). Le simple déplacement de position d'un ion parallèlement au côté d'un triangle, traduit un enrichissement ou un appauvrissement relatif de l'eau minérale pour l'ion concerné. Par exemple, la comparaison sur un même gisement d'eaux minérales en provenance de deux forages, l'un profond, l'autre plus superficiel, et pour lesquels on noterait des teneurs en sulfates supérieures sur le forage le plus superficiel, pourrait traduire des dissolutions (SO_4^{2-}) lors du transit des eaux depuis la profondeur vers la surface.

2.3 LE DIAGRAMME A COORDONNEES RAYONNANTES

Le diagramme à coordonnées rayonnantes concerne une représentation géométrique caractérisée par :

- 1 carré de 33 mm de côté, de surface sensiblement égale à 10 cm² qui représente par convention un extrait sec mesuré à 180°C de 1 g/l.
- 2 diagonales de ce carré sur lesquelles sont portées, à partir des angles, des unités de longueur correspondant au nombre de milli-équivalents de chacun des radicaux (anions et cations majeurs). En général 1 meq = 1 mm, cependant, il est possible de modifier l'échelle. Les points se rapportant d'une part aux anions et d'autre part aux cations, sont réunis par un trait contournant le carré.
- 1 cercle représentant la minéralisation globale de l'eau minérale considérée, centré sur le point d'intersection des diagonales du carré et dont la surface en millimètres carrés équivaut à la valeur de l'extrait sec à 180°C exprimée en milligrammes par litre.

La figure 3, page 7 , présente une illustration du diagramme à coordonnées rayonnantes.

- NOTA :
- La comparaison du cercle avec la surface du carré de base permet immédiatement de se rendre compte si la minéralisation globale est supérieure ou inférieure à 1 g/l suivant que le cercle est inscrit ou circonscrit..
 - L'inconvénient majeur de ce type de représentation graphique réside dans la difficulté à faire figurer plusieurs analyses sur un même diagramme pour comparaison (la superposition de traits et cercles additionnels rend délicat la lecture).

3. MODALITES D'UTILISATION DES GRAPHIQUES

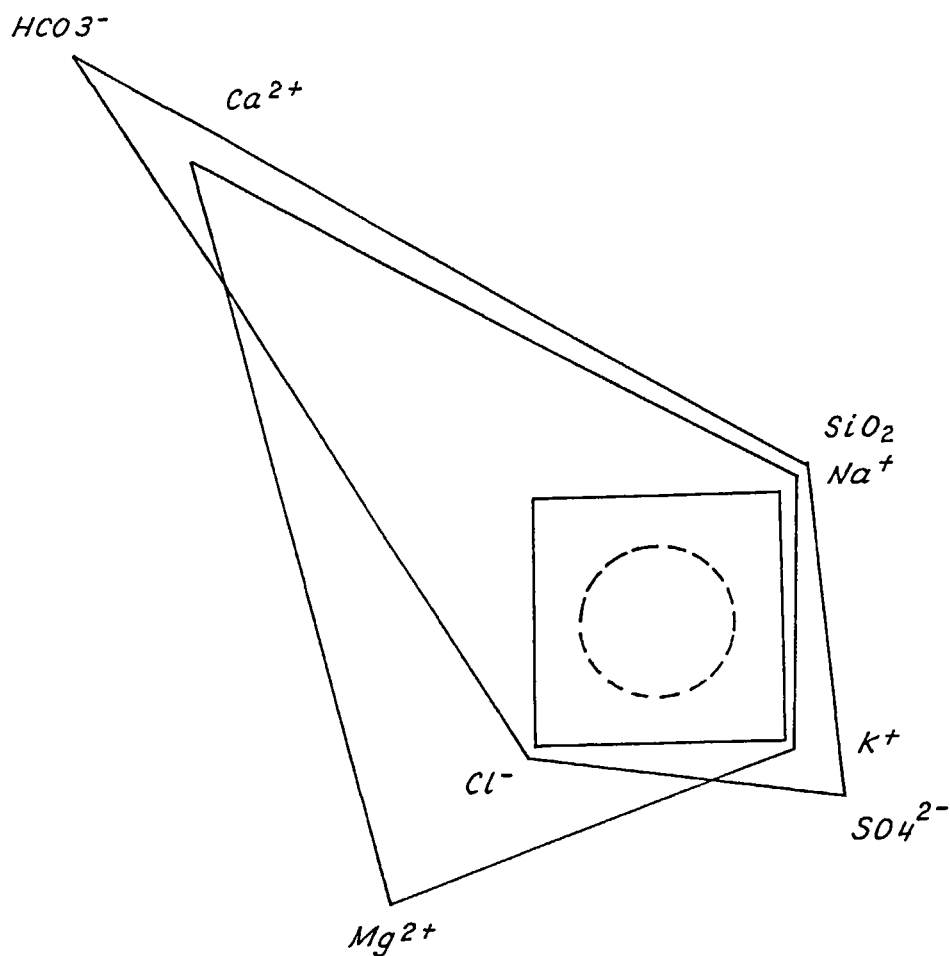
3.1 IDENTIFICATION DES FACIES PHYSICO-CHIMIQUES (type d'eau)

La représentation graphique permet avant tout de mettre en évidence les caractères dominants de l'échantillon examiné, pour permettre d'en identifier le type du premier coup d'oeil quitte, une fois ce type déterminé, à signaler par ailleurs les autres ions éventuellement présents :

- soit que l'on se reporte au tableau analytique habituel où chacun des anions et des cations dosé est accompagné du nombre exprimant sa concentration en milli-équivalents par litre ;
- soit sous forme d'une énumération simple s'il s'agit d'ions dont on peut affirmer la présence, mais sans qu'il soit possible de les doser avec précision (en particulier à la suite d'un examen spectrographique).

Par cette approche on a l'avantage de séparer nettement :

- d'une part, les éléments fondamentaux qui, par la quantité prédominante de l'un d'eux (spécialement anions), confèrent à l'eau son "type" essentiellement "quantitatif" ;
- d'autre part, les autres éléments [S, Fe, As, Cu, etc.] qui, par leur présence inhabituelle, font de l'eau les contenant une "variété" spéciale essentiellement "qualitative", beaucoup plus que fonction de leur quantité, celle-ci restant faible et parfois indosable.



Echelle : 1 mm = 1,6 még/l

CATIONS		ANIONS	
en mg/l	en még/l	en mg/l	en még/l
Ca++ : 82,3	Ca++ : 4,1	HCO3- : 330	HCO3- : 5,4
Mg++ : 22,5	Mg++ : 1,8	Cl- : 2,1	Cl- : 0,06
Na+ : 4,4	Na+ : 0,2	SO4-- : 31,8	SO4-- : 0,66
K+ : 0,8	K+ : 0,02	F- : 0,1	F- : -
Résidu sec à 180°C : 340 mg/l			
SiO2 : 9,2 mg/l			

Eau minérale type bicarbonatée calcique et magnésienne

Fig. 3 - Exemple de diagramme à coordonnées rayonnantes

Après confrontation des résultats de nombreuses analyses, il est généralement admis que les 4 variétés d'anions et de cations suivants conditionnent les différents "types" d'eaux minérales par leurs variations quantitatives :

Pour les anions : HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-}

Pour les cations : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

NOTA : Le choix du radical SiO_3^{2-} pour le diagramme à coordonnées rayonnantes est lié au fait que si dans les eaux minérales, l'anion SiO_3^{2-} est exceptionnellement prédominant, il peut parfois exister en quantité telle que le fait d'en négliger le dosage fausse l'équilibre de la balance ionique, c'est pourquoi il est retenu, ce qui permet par ailleurs de séparer dans les cations, Na^+ et K^+ , groupés pour les diagrammes de Schoeller Berkaloff et de Piper.

Les critères de classification des eaux minérales naturelles, selon le Ministère de la Santé, sont résumés dans le tableau suivant :

Extrait sec à 180°C Limite		CO ₂ libre (mg/l) Qualificatif Limite	Anion dominant	Le ou les Cations dominant (s)
Très faiblement minéralisée	< 50	Gazeuse > 250	Bicarbonatée	Sodique
Faiblement minéralisée	50 à 500		Sulfatée	Calcique
Moyennement minéralisée	500 à 1000		Sulfurée	Magnésienne
Minéralisée	1000 à 1500		Chlorurée	Mixte
Très fortement minéralisée	> 1500			

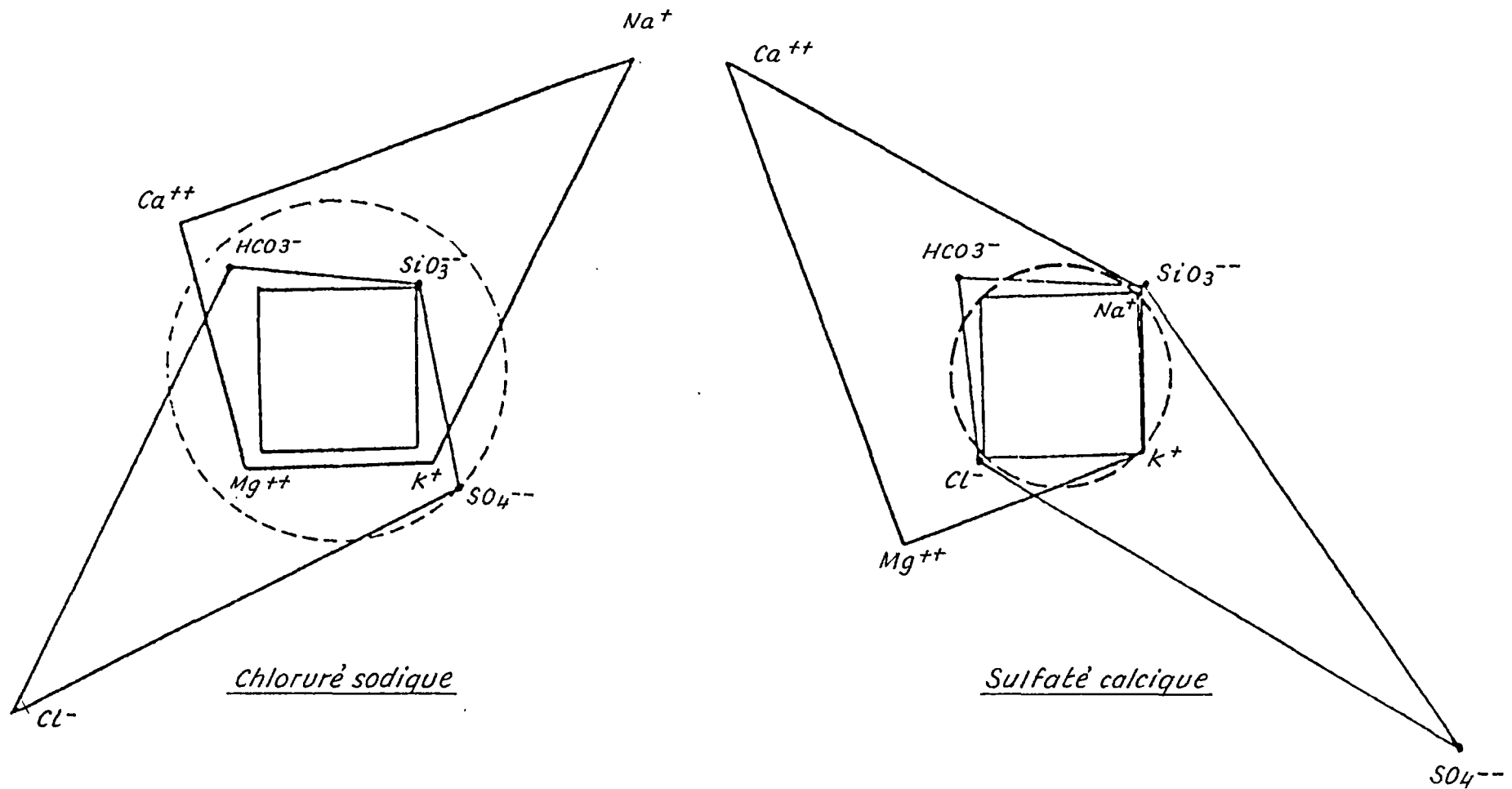
En complément de ce tableau, les éléments remarquables par leur nature (fer, manganèse, silice, arsenic, fluor, lithium, strontium, sélénium) peuvent éventuellement être indiqués.

A titre d'exemple, on notera les représentations graphiques suivantes :

- sur la figure 1 (page 2), distinction entre deux facies distincts selon le diagramme de Schoeller Berkaloff,
- sur la figure 2 (page 4), distinction entre divers facies selon le diagramme de Piper,
- sur les figures 4 et 4 bis (page 9 et 10), distinction entre 4 facies physico-chimiques très différents selon le diagramme à coordonnées rayonnantes.

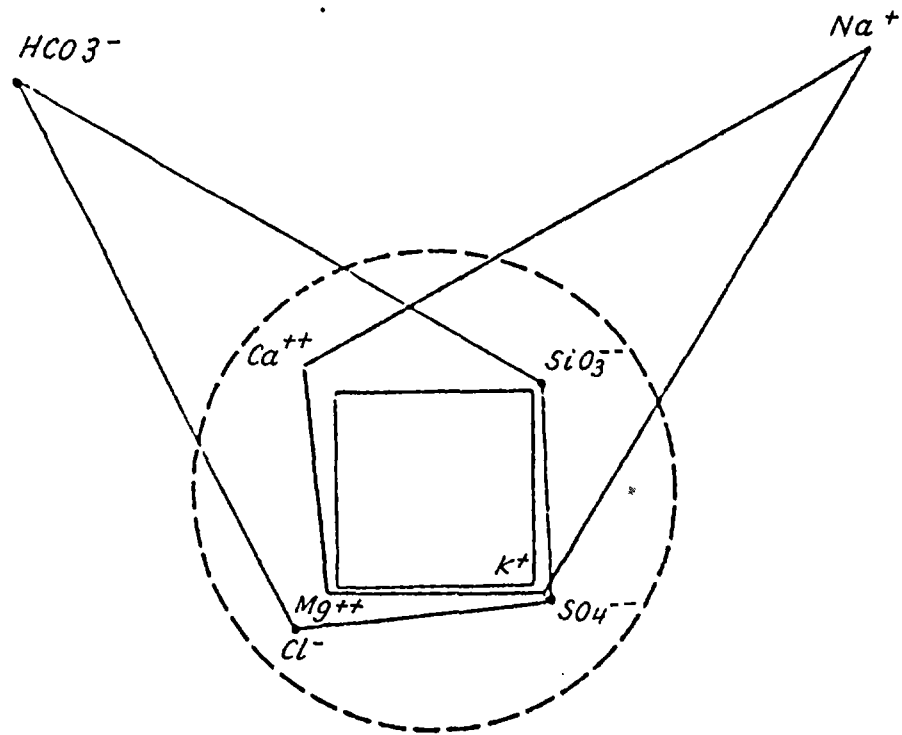
3.2 CONTROLE DE LA STABILITE D'UNE EAU MINERALE

En préalable à la présentation des modalités d'utilisation des graphiques pour mettre en évidence la stabilité d'une eau minérale, il est utile de préciser cette notion de stabilité selon l'approche du Ministère de la Santé. Le principe de base retenu dans la réglementation est que la qualité d'une eau minérale doit être conservée dans ses constituants essentiels (étant donnée la difficulté de considérer tous les paramètres physico-chimiques).

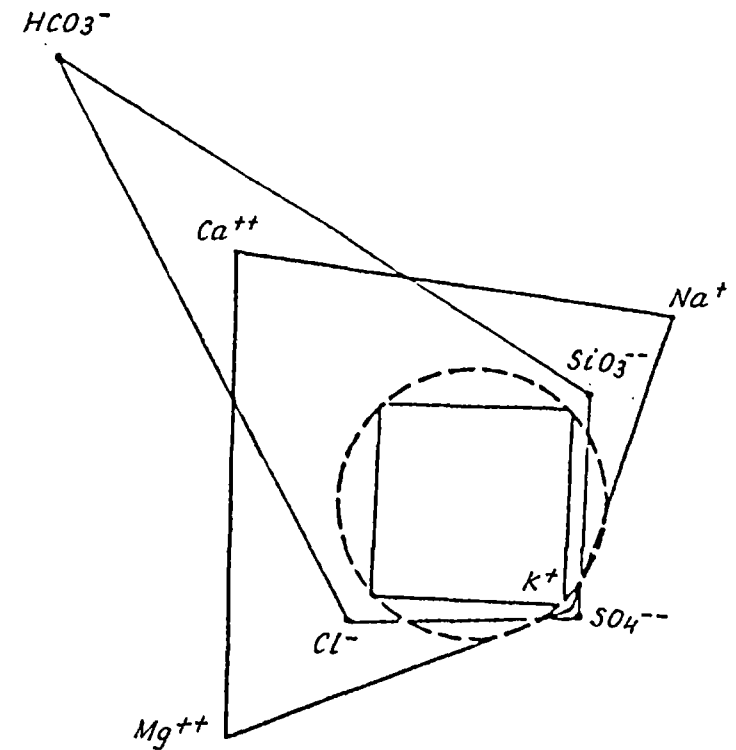


(les figures originales ont été réduites de 1,25 fois à la reproduction)

Fig. 4 - Exemples de facies physico-chimiques distincts



Bicarbonaté sodique



Bicarbonaté mixte

(les figures originales ont été réduites de 1,25 fois à la reproduction)

Fig. 4 bis - Exemples de facies physico-chimiques distincts

Par référence à la classification physico-chimique des eaux, les constituants essentiels sont :

- le gaz carbonique libre, si l'eau est gazeuse,
- les bicarbonates et les carbonates,
- les sulfures,
- si l'eau n'est pas sulfurée, le ou les anions caractéristiques (sulfates, chlorures),
- le ou les cations dominants, voire certains éléments traces s'ils confèrent à l'eau ses propriétés favorables à la santé ou une originalité.

Pour une eau minérale naturelle, l'étude de la stabilité de la composition physico-chimique ne se justifie que sur les résultats de ces constituants essentiels.

Une eau minérale naturelle est considérée comme stable lorsque l'on met en évidence :

- l'absence de dérive de sa composition au cours du temps,
- l'inclusion de la concentration de chaque constituant essentiel dans la fourchette admise de fluctuations naturelles autour de la valeur de référence (pour chaque constituant essentiel, parfois fixée à 10 % par arrêté ministériel, ou égale à la valeur de l'exactitude de la méthode utilisée si celle-ci est plus importante).

La qualité d'une eau minérale naturelle est considérée comme modifiée lorsque, au cours du temps :

- son type physico-chimique évolue,
- le diagramme représentatif de la composition de l'eau est modifié,
- la concentration d'au moins un des constituants essentiel dépasse la fourchette admise de fluctuations naturelles.

NOTA :

- La notion de stabilité telle définie ci-avant, implique la nécessité de réaliser plusieurs analyses physico-chimiques espacées dans le temps, pour caractériser une émergence.
- La notion d'écart de la composition physico-chimique d'une eau par rapport à l'analyse de référence (tolérance de 10 %) n'a pas de fondement réglementaire strict. Des études sont en cours pour caractériser tant les fluctuations naturelles "usuelles" que les modalités d'application de cette valeur limite de 10 % (voire plus) selon que l'on considère la minéralisation totale, chacun des paramètres, les seuls constituants essentiels ou d'autres références.

On le voit, les graphiques seront une aide précieuse pour juger de la stabilité d'une eau, encore faudra-t-il garder un esprit critique sur les divers modes de représentation et parfois étudier avec attention les valeurs brutes des analyses pour lesquelles il est fortement conseillé de disposer d'un tableau de synthèse globale.

3.3 REPRESENTATIONS GRAPHIQUES SPECIFIQUES

Il peut exister dans certains contextes particuliers, la nécessité de mettre en évidence telle ou telle variation dans le temps d'un paramètre représentatif, voire telle ou telle corrélation entre deux ou plusieurs paramètres. Des approches de ce type induisent des représentations graphiques spécifiques dont les expressions peuvent être très variées.

Le présent paragraphe n'a pas pour objet de présenter chaque cas particulier, mais de sensibiliser au fait que le domaine des représentations graphiques est vaste et peut être habilement utilisé dans certains cas pour renforcer la validité des dossiers.

A titre d'exemple, la figure 5 - page 13, représente un cas particulier de gisement hydrominéral complexe pour lequel la référence agréée (une émergence naturelle anciennement captée) représente un mélange entre deux ressources aquifères distinctes, recaptées séparément par des forages captant d'une part les eaux d'un pôle minéral profond et d'autre part des eaux d'un pôle minéral peu profond et faiblement minéralisé.

4. CONCLUSION

Le domaine des représentations graphiques permet une interprétation plus aisée des résultats d'analyses réalisées pour caractériser une eau minérale.

Les graphiques sont utilisés pour caractériser le faciès d'une eau minérale et pour établir des comparaisons entre différentes analyses, que ce soit pour la même émergence dans le cadre de fluctuations dans le temps, ou que ce soit entre diverses émergences dans le cadre de l'étude d'appartenance à un même gisement.

L'interprétation des données présentées sous forme de graphique nécessite de conserver un esprit critique par rapport aux résultats en n'oubliant pas que les analyses sont le reflet d'une situation hydrogéologique particulière. Il convient d'analyser un dossier dans sa globalité.

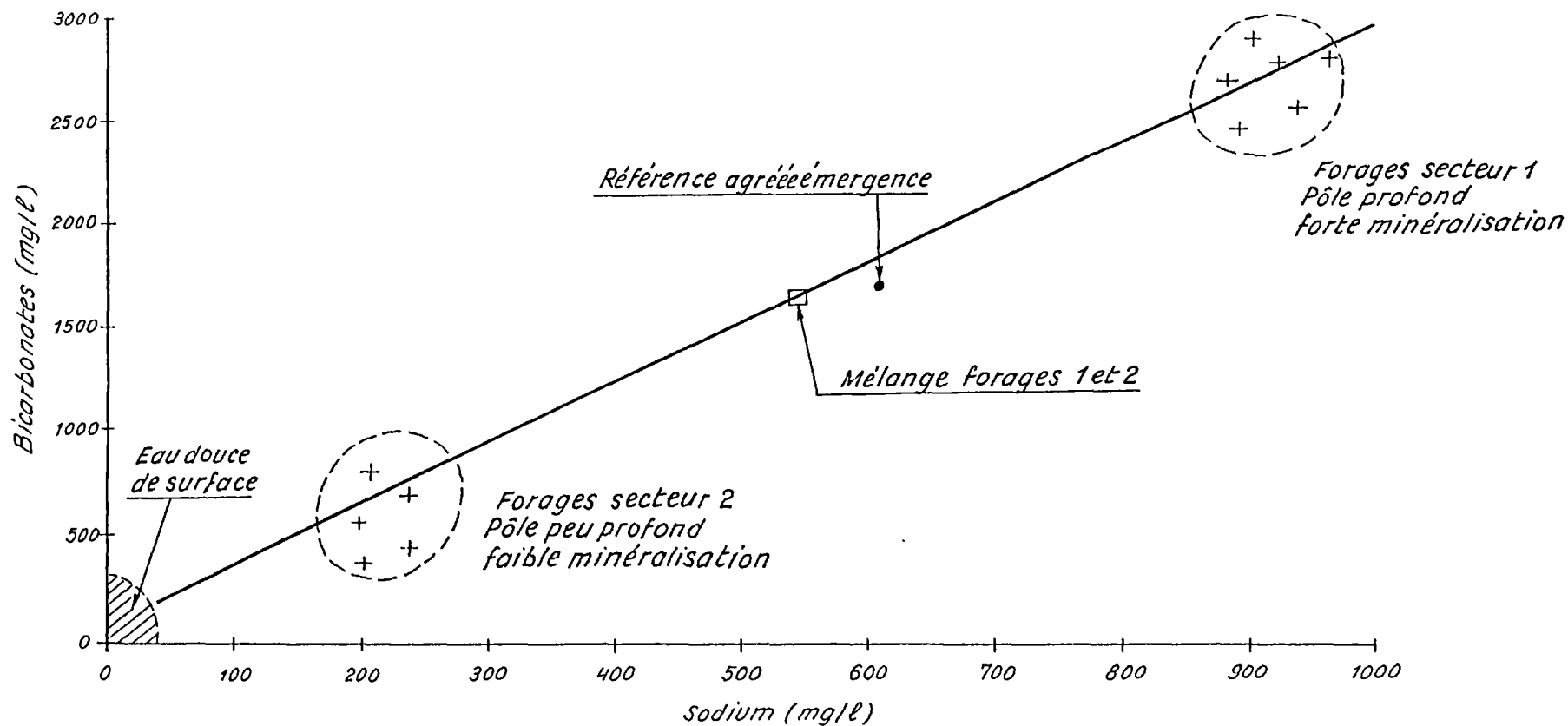


Fig. 5 - Graphique spécifique : exemple de classement des sources d'un gisement

BIBLIOGRAPHIE

- ☞ Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine - séance du 24 octobre 1961
- ☞ Les eaux souterraines - H. Schoeller - Edition Masson - 1962
- ☞ WATER QUALITY DATA - Analysis and Interpretation - Edition Lewis Publishers - 1995



Les méthodes géophysiques utilisées en recherche d'eau minérale

Note technique n° 9

Octobre 1997

R É S U M É

Les méthodes de prospection géophysique constituent des outils très appréciables pour la conduite d'un programme de recherche hydrogéologique que ce soit pour identifier de nouvelles ressources ou pour améliorer la connaissance d'un gisement.

Le choix d'une méthode géophysique et du programme technique doit être établi après examen du problème posé, des données géologiques et des conditions d'environnement. Ce choix conduit à retenir le ou les paramètres physiques susceptibles de présenter un contraste suffisant pour répondre à l'objectif.

Les principales méthodes utilisées en géophysique appliquée pour les eaux souterraines peuvent être regroupées suivant le paramètre physique étudié et l'origine du champ mesuré selon le tableau résumé ci-joint qui présente une synthèse des informations essentielles développées dans la présente note (*).

Quelque soit la méthode utilisée, l'analyse des résultats d'une mesure sera fortement valorisée si l'on dispose d'un ouvrage de reconnaissance (forage) permettant de caler l'interprétation des données.

(*) Les coûts sont donnés à titre purement indicatif pour relativiser une méthode par rapport à une autre. Il est clair que le coût d'une campagne géophysique dépend du quantitatif des travaux programmés.

TABLEAU RESUME DES METHODES GEOPHYSIQUES [1]

Méthode	Paramètre étudié	Grandeur mesurée	Conditions de mise en oeuvre	Coût [2]	Résultats des mesures/interprétation	Interprétation des données obtenues - Résultat (R =) Observation - Commentaires
Polarisation spontanée	d.d.potentiel naturelle	d.d.potentiel et intensité	peu complexe 1 opérateur	*	profil de ddp naturelle (d.d.p / référence)	R= discontinuité dans le sous sol le long du profil (failles, fractures....) Méthode simple d'interprétation assez directe (circulation d'eau)
Sondage électrique	Résistivité apparente	d.d.potentiel et intensité	peu complexe 1 équipe 4pers	**	courbe de la résistivité = f(profondeur)	R= épaisseur et résistivité vraie des terrains traversés (coupe) Interprétation par un géophysicien - Méthode très courante
Trainé électrique	Résistivité apparente	d.d.potentiel et intensité	peu complexe 1 équipe 4pers	**	profil horizontal de la résistivité = f(distance)	R= discontinuité dans le sous sol le long du profil (failles, fractures....) Interprétation par un géophysicien - Méthode très courante
Panneau électrique et Carte de résistivité	Résistivité apparente	d.d.potentiel et intensité	peu complexe 1 équipe 2pers	**	coupe verticale de la résistivité Carte de la résistivité sur un secteur	R= résistivité apparente du secteur étudié selon une coupe Définition d'anomalies de résistivité Interprétation par un géophysicien - méthode assez courante - R= résistivité apparente du secteur étudié selon un plan (surface du sol) Définition d'axe de structure géologique
Sismique Haute Résolution	Vitesse d'onde	Temps de transfert	très complexe, des spécialistes géophysiciens, matériel lourd	*****	coupe sismique	R= temps de transfert en fonction (profondeur et distance) = "coupe géol" Avec ou sans forage associé, la méthode nécessite une équipe très spécialisée et des moyens matériels et informatiques lourds d'acquisition et de traitement des données. Méthode très performante.
Micro Gravimétrie	Densité	Accélération de la pesanteur	assez complexe 1 opérateur (+ correction topo)	**	carte des anomalies de densité sur un secteur	R= contraste de densité dans le sol (vide, filon, zones fracturées...) Interprétation par un géophysicien Méthode utilisée pour des cas assez particuliers (peu courante).
Magnétique	Susceptibilité magnétique	Champ magnétique terrestre	peu complexe 1 opérateur	*	profil ou carte de l'intensité du champ magnétique	R= variation de la susceptibilité magnétique le long du profil (filon). Interprétation par un géophysicien Méthode utilisée pour des cas assez particuliers (peu courante).
Résonance Magnétique Protonique	Résonance magnétique des protons	Champ magnétique de relaxation	Matériel et équipes spécialisés	**	Log vertical de la teneur en eau du secteur étudié	R= présence ou absence d'eau et indication de la taille des pores du terrain Interprétation par un géophysicien spécialisé Méthode nouvelle dont les applications devraient se développer
Electro - Magnétique	Résistivité	Champ électrique et magnétique	peu complexe 1 équipe 2pers	**	profil horiz. ou carte de la résistivité = f(distance) ou résistivité sur le secteur	R= discontinuité dans le sous sol le long du profil ou sur le secteur Interprétation par un géophysicien Méthode utilisée pour des cas assez particuliers (peu courante).
Diagraphies Nucléaires	radioactivité	activité radioactive	Matériel et équipes spécialisés	**	Log (=profil vertical) de l'activité radioactive en fonction de la profondeur	R= variations le long d'un profil vertical (variation des teneurs en eau) Interprétation par un spécialiste géophysicien Méthode assez courante (définition de la teneur en argile des terrains traversés)
Diagraphies Electriques	résistivité apparente	d.d.potentiel et intensité	Matériel et équipes spécialisés	**	Log (=profil vertical) de la résistivité en fonction de la profondeur	R= variations le long d'un profil vertical (qualité de l'eau, fractures....) Interprétation par un spécialiste géophysicien Méthode assez courante
Diagraphies Acoustiques	Vitesse d'onde	Temps de transfert	Matériel et équipes spécialisés	***	Log (=profil vertical) du temps de transfert d'onde en fonction de la profondeur	R= variations le long d'un profil vertical (direction et pendage des fractures...) Interprétation par un spécialiste géophysicien Méthode peu courante , très intéressante en milieux fracturés

[1] Liste non exhaustive des seules méthodes les plus couramment utilisées en eaux minérales - [2] ordre de grandeur du coût minimal de mise en oeuvre.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. LES MÉTHODES DE PROSPECTION ELECTRIQUE	1
2.1 Polarisation spontanée (P.S.)	1
2.2 Sondage électrique	2
2.3 Trainé électrique	3
2.4 Panneau électrique au sol	4
3. LES MÉTHODES DE PROSPECTION SISMIQUE	4
3.1 Les méthodes de surface (sismique HR ou Haute Résolution)	5
3.2 Les méthodes avec forages associés	5
4. LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE	6
5. LA MÉTHODE MAGNÉTIQUE	7
6. LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES	7
6.1 V.L.F. Sol (Very Low Frequency)	7
6.2 Electromagnétisme à émetteur proche contrôlé	8
6.3 Résonance magnétique protonique (R.M.P.)	8
7. LES MÉTHODES DE PROSPECTIONS EN FORAGES	9
7.1 Diagraphies nucléaires	9
7.1.1 Diagraphie gamma-ray naturel	9
7.1.2 Diagraphie gamma-ray sélectif	10
7.1.3 Diagraphie neutron-neutron	10
7.2 Diagraphies électriques	11
7.2.1 Diagraphie Polarisation Spontanée (PS)	11
7.2.2 Imagerie électrique	11
7.3 Diagraphies acoustiques	11
7.3.1 Diagraphie sonique	11
7.3.2 Imagerie acoustique	12
8. CONCLUSIONS	13
BIBLIOGRAPHIE	14

LISTE DES FIGURES

Tableau 1 : Les techniques de géophysique appliquée dans le domaine des eaux souterraines

Figure 1 : Sondage et trainé électrique - Schémas théoriques

Figure 1bis : Sondage électrique et panneau de résistivité - Exemples terrain

Figure 2 : Exemple de résultat d'une investigation sismique Haute Résolution (Coupe de terrain restituée par traitement informatique)

Figure 3 : Exemple de réponses de profil magnétique (filon et sphère)

Figure 4 : Exemple de réponse d'une diagraphie gamma et neutron

Figure 5 : Exemple de résultat d'une investigation type "imagerie acoustique"

1. INTRODUCTION

Les méthodes géophysiques constituent des outils performants d'acquisition de données indirectes sur la géologie pour l'étude des gisements d'eau minérale. La note technique n° 1 a présenté les méthodes géophysiques parmi d'autres méthodes en précisant l'importance et les objectifs fixés à chacune, ainsi que les relations entre elles.

Dans le détail, la panoplie des méthodes géophysiques est extrêmement large comme en témoigne le tableau 1 issu du Code de bonne pratique de la géophysique appliquée élaboré en 1992 par les organismes BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), CGG (Compagnie Générale de Géophysique), CPGF (Compagnie de Prospection Géophysique Française) et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) avec l'aide du Ministère de l'Industrie (cf bibliographie).

La présente note technique n'a pas pour but de présenter de façon exhaustive les différentes méthodes, mais de présenter les méthodes géophysiques les plus couramment utilisées. Pour chacune on s'est attaché à exposer le principe de la mesure, à en préciser l'application (domaine et condition d'application) et enfin à présenter le type de résultat fourni. Concernant le coût de ces méthodes, un ordre de grandeur est donné dans le tableau synthèse présenté en résumé. Le coût d'une campagne de prospection géophysique dépend du type de problème posé et de l'adéquation entre la mise en oeuvre de la méthode projetée et ce problème (surface à étudier, densité de mesure, ...). L'ordre de grandeur donné l'est donc à titre indicatif.

On notera que le résultat d'une investigation géophysique concerne l'acquisition de données selon 1 ou 2 dimensions dans l'espace. Ainsi pour une étude donnée, on obtiendra selon les cas :

- un profil (1 dimension) = déplacement au sol et profondeur fixée ;
- un log ou courbe fonction de la profondeur (1 dimension) = déplacement en profondeur et position au sol fixe ;
- une carte (2 dimensions) = déplacement au sol selon x et y (surface sol) ;
- une coupe (2 dimensions) = déplacement au sol selon une direction et en profondeur.

Nota : Pour des moyens d'acquisitions d'informations et de traitement de données très sophistiqués, on peut aboutir à un bloc diagramme (3 dimensions).

Certains schémas et exemples caractéristiques illustrent les descriptions techniques.

2. LES MÉTHODES DE PROSPECTION ELECTRIQUE

2.1 Polarisation spontanée (P.S.)

PRINCIPE :

Cette méthode concerne la mesure d'une différence de potentiel d'origine naturelle entre deux points du sol. Les courants électriques induits sont liés à des phénomènes électrocinétiques et électrochimiques (distincts des courants Telluriques qui provoquent des perturbations de mesure).

[illegible]

GUIDE D'ADEQUATION

EAUX SOUTERRAINES

- ☐ Technique considérée comme non applicable.
☐ Technique d'emploi mal adapté sauf exception.
☐ Technique d'emploi limité, utilité à justifier.
☐ Technique d'emploi adaptée mais potentiellement incomplète ou à combiner avec d'autres techniques géophysiques.
☐ Technique généralement considérée comme fournissant une excellente approche.

Extrait du Code de Bonne Pratique Mars 1992

Tableau 1 - Les techniques de géophysique appliquée dans le domaine des eaux souterraines

APPLICATION :

Les phénomènes électrocinétiques sont liés entre autre au mouvement de l'eau : infiltration de l'eau de pluie, écoulement des nappes.

Les phénomènes électrochimiques se produisent lorsque :

- a) Deux formations en contact se comportent comme des solutions à concentration différente : cas d'argiles et de sables aquifères par exemple ;
- b) Une masse conductrice (amas de minerais métalliques ou schistes graphiteux) est partiellement enfouie sous le niveau hydrostatique.

Les amas métalliques et les schistes graphiteux donnent parfois naissance à des courants qui induisent des différences de potentiel de plusieurs centaines de millivolts. Les potentiels spontanés d'origine électrocinétique sont beaucoup plus faibles que ceux d'origine électrochimique.

De mise en oeuvre relativement simple quant au matériel (1 jeu d'électrodes impolarisables et 1 millivoltmètre à haute impédance d'entrée) cette méthode, peu onéreuse, nécessite cependant un opérateur qualifié pour la mesure et l'interprétation des résultats.

RÉSULTAT :

La méthode permet l'obtention de carte d'équipotentiellles ou de profils avec représentation d'anomalies positives ou négatives.

Nota : Pour cette méthode comme pour toutes celles recherchant des anomalies, qui sont les cibles de la prospection, on notera qu'il s'agit de mettre en évidence des discontinuités dans le sous-sol (fractures, fissures, faille, ...), potentiellement associées à des transferts d'eau. Ces discontinuités (anomalies) orienteront les reconnaissances à venir (géophysique complémentaire, forage de reconnaissance, ...).

2.2 Sondage électrique

PRINCIPE :

Cette méthode, très utilisée et fournissant généralement une bonne approche initiale, consiste en l'analyse de la résistivité apparente du sous sol (ρ_a) mesurée par un dispositif quadripôle symétrique (ABMN) pour une succession d'écartements des électrodes AB. La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier la distance entre les électrodes A, B d'envoi de courant (cf distance AB variable sur la figure 1 - schéma a). On peut estimer (en approche simplifiée) la profondeur d'investigation comprise entre $AB/4$ à $AB/10$ en fonction des résistivités.

La différence de potentiel mesurée entre M et N traduit une résistivité apparente (ρ_a) liée aux résistivités vraies et aux épaisseurs de toutes les couches intéressées par le dispositif ABMN.

APPLICATION :

La méthode est applicable en terrain tabulaire à l'échelle du dispositif, lorsqu'il existe des contrastes de résistivité entre les couches de terrains (niveaux aquifères, biseau salé, socle ...).

La mise en oeuvre des mesures nécessite une équipe qualifiée réduite. Le coût de mise en oeuvre reste relativement peu élevé (cf tableau résumé).

RÉSULTAT :

Les données obtenues sont traduites sous forme de diagramme logarithmique de type $\rho_a = f(AB/2)$ (résistivité apparente en fonction de la distance AB) dont l'interprétation nécessite l'utilisation de petits programmes informatiques ou d'abaque (cf. figure 1 - schéma b - pour un sondage relatif à 2 terrains de résistivité respectives ρ_1 et ρ_2).

On obtient ainsi en 1 point donné une image de la coupe géologique (exprimée en résistivité) à la verticale du lieu d'investigation.

Nota : La variation de résistivité peut être liée à la saturation en eau du sol ainsi pour un même horizon géologique les zones saturées d'une part (sous le niveau d'eau) et non saturées d'autre part (hors d'eau) représenteront 2 terrains distincts.

La courbe obtenue permet de préciser l'épaisseur des terrains au droit du sondage. La figure 1 bis - schéma a présente le résultat d'un sondage électrique interprété. On obtient la répartition des résistivités des terrains en fonction de la profondeur.

Nota : Sur l'exemple présenté, un terrain résistant (60 Ohm-m) apparaît à partir de 14 mètres de profondeur. Cette information orientera la poursuite de l'investigation si l'on recherche par exemple un milieu consolidé (calcaire...) sur des formations tendres (alluvions...) ce qui est probablement le cas. Les investigations dans le calcaire, pour y identifier des fracturations nécessiteront un dispositif dont la profondeur utile dépassera 14 mètres (pour l'exemple présenté).

2.3 Trainé électrique

PRINCIPE :

Cette méthode, souvent complémentaire de la précédente, consiste en l'analyse de la résistivité apparente du sous-sol par un quadripôle symétrique ABMN de dimension constante, trainé le long d'un profil.

La dimension du dispositif (fixe) induit une profondeur d'investigation à peu près constante. On obtient ainsi une image du sous-sol pour la profondeur retenue, le long de la ligne suivie par le trainé.

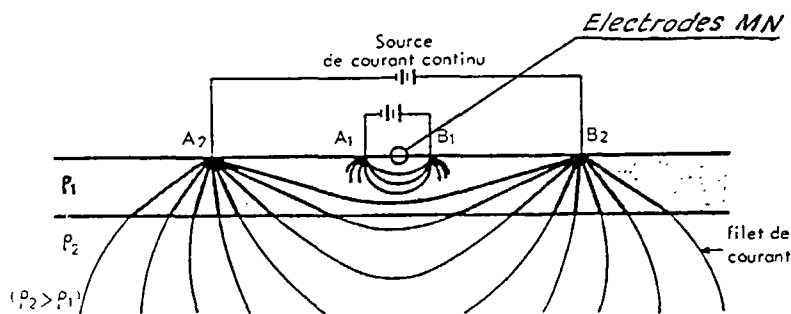
APPLICATION :

La méthode est applicable lorsqu'il existe des contrastes de résistivités latérales (zone faillée, contact lithologique ...). Cette méthode, nécessite une équipe qualifiée analogue à celle utile pour la réalisation d'un sondage électrique.

RÉSULTAT :

Les données obtenues se présentent sous forme d'un graphique de résistivité apparente en fonction de la distance, le long du parcours suivi par le dispositif (cf. figure 1 - schéma c).

Le graphique permet d'identifier des variations latérales de résistivité qui marquent des discontinuités du sous-sol (cible recherchée).

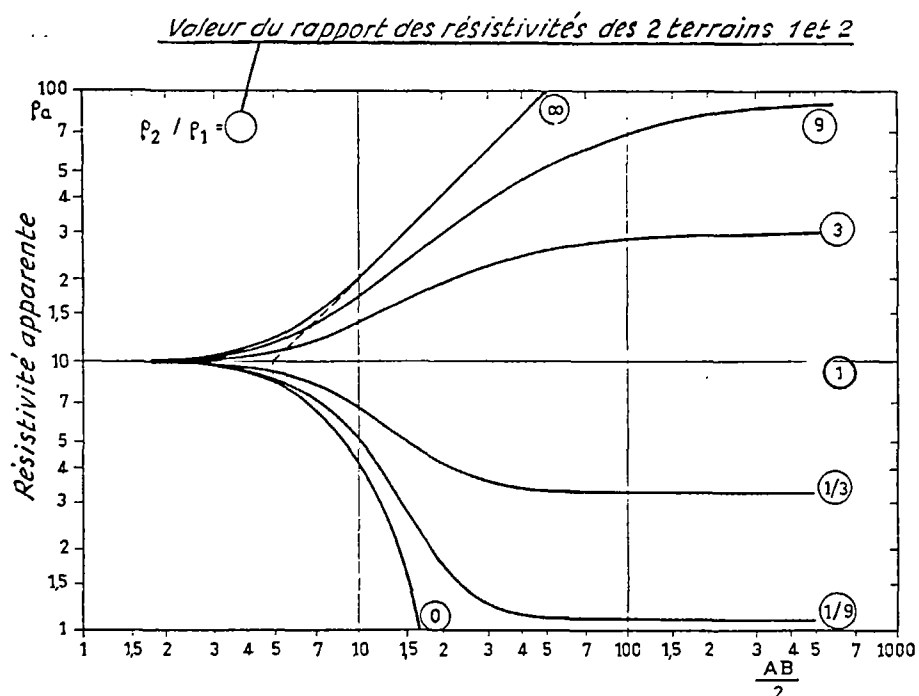


SCHEMA A

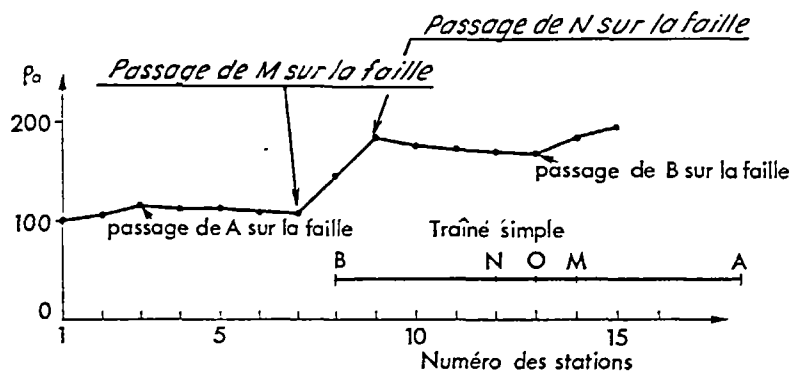
— La profondeur d'investigation augmente avec la distance AB.

SCHEMA B

Courbe $\rho_a = f(AB/2)$
(résistivité apparente en fonction de la demi distance d'écartement des électrodes d'injection)



— Exemples de sondages électriques deux terrains.



SCHEMA C



— Profil de résistivité sur une faille verticale.
(D'après la Compagnie Générale de Géophysique.)

Figure 1 - Sondage et trainé électrique - Schémas théoriques

2.4 Panneau électrique au sol et carte de résistivité

PRINCIPE :

Ces méthodes consistent à mesurer, à la verticale d'une série d'électrodes MN, la résistivité apparente pour différentes positions d'une électrode d'injection (AB). Elle permet la description et la localisation des discontinuités du sous-sol, à partir de la distribution des résistivités apparentes.

Pour le panneau électrique, le dispositif ABMN est variable et se déplaçant le long d'une ligne permet l'obtention d'une coupe. Pour la carte de résistivité on travaillera avec un dispositif ABMN relatif à une profondeur d'investigation constante et on obtiendra une image plan (on parle souvent de méthode du rectangle).

APPLICATION :

La méthode du panneau électrique et de la carte de résistivité est appliquée à la mise en évidence, par exemple, de zones faillées fracturées ou fissurées en site calcaire et cristallin, à la recherche karst, failles ou vides. La mise en oeuvre et le coût de cette méthode sont sensiblement similaires à ceux d'un trainé.

RÉSULTAT :

La restitution des données se fait sous forme d'une coupe verticale pour le panneau électrique ou d'une carte de résistivités pour la méthode du rectangle.

La figure 1 bis - schéma b permet de visualiser le résultat d'une carte de résistivité.

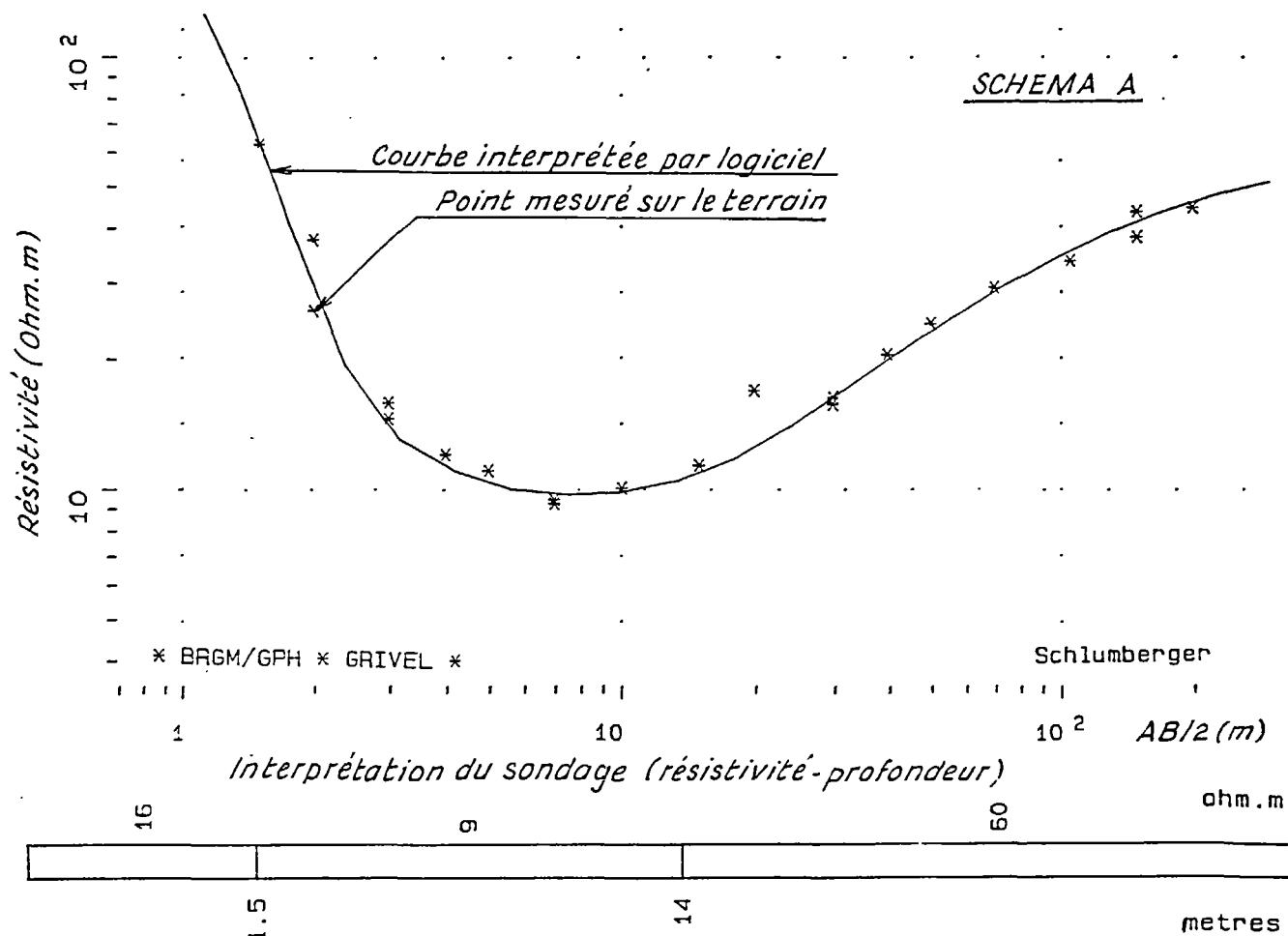
3. LES MÉTHODES DE PROSPECTION SISMIQUE

PRINCIPE :

Le principe de la prospection sismique est lié au fait que si en un point du sol on provoque un ébranlement, il se propage de proche en proche en s'amortissant ; le temps nécessaire pour qu'il atteigne des récepteurs dépend de la nature et de la disposition des formations géologiques. La prospection sismique a pour base l'étude de ce temps de propagation. L'ébranlement du sol se traduit par une émission d'ondes élastiques.

Nota : Il existe deux méthodes de prospection sismique, la sismique réfraction et la sismique réflexion. Si la réfraction a longtemps concerné le domaine de l'hydrogéologie, la réflexion, dont les objectifs habituels sont profonds (recherche pétrolière) est de nos jours appliquée aux explorations de faible profondeur, avec des moyens nouveaux, on parle de sismique Haute Résolution.

La vitesse de propagation des ondes élastiques dans le sol est comprise entre de larges limites : inférieure parfois à la vitesse du son dans les tourbes et les terrains superficiels meubles et secs, elle peut atteindre 6 km/sec. dans le granite. Pour un même type de roche, elle diminue avec le degré d'altération, de fissuration ou de fracturation ; elle augmente par contre généralement avec la profondeur. Dans les dépôts meubles, elle est plus élevée au-dessous du niveau hydrostatique qu'au-dessus ; dans la tranche imbibée, elle décroît si la porosité augmente.



SCHEMA B



Figure 1bis - Sondage électrique et carte de résistivité - Exemples terrain

APPLICATION :

Le domaine d'application des méthodes sismiques est très large dès lors qu'il existe des contrastes d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité) permettant d'obtenir de bons réflecteurs.

Les mesures de terrain nécessitent la mise en oeuvre d'un système d'émission d'une vibration (ébranlement du sol à l'aide de petites charges d'explosif ou d'un camion vibreur), des géophones d'enregistrement des vibrations et une centrale d'acquisition et de stockage des données obtenues (camion laboratoire).

RÉSULTAT :

On obtient une image détaillée de l'extension structurale horizontale et verticale des différents horizons géologiques réflecteurs. La mise en oeuvre des méthodes sismiques peut concerner des mesures en surface ou avec un forage associé (cf paragraphe 3.1 et 3.2 ci-après).

3.1 Les méthodes de surface (sismique HR ou Haute Résolution)

Les méthodes de surface en sismique Haute Résolution (HR) consistent en la réalisation d'un profil d'enregistrement suivant une ligne le long de laquelle se déplacent le dispositif d'émission de vibration (tirs) ainsi que les géophones. Le résultat de ces investigations est l'établissement d'une "coupe sismique" des terrains à partir des données enregistrées (expression des temps de transfert en fonction de la profondeur et du déplacement sol du dispositif de mesure).

Il convient de noter les points forts suivants :

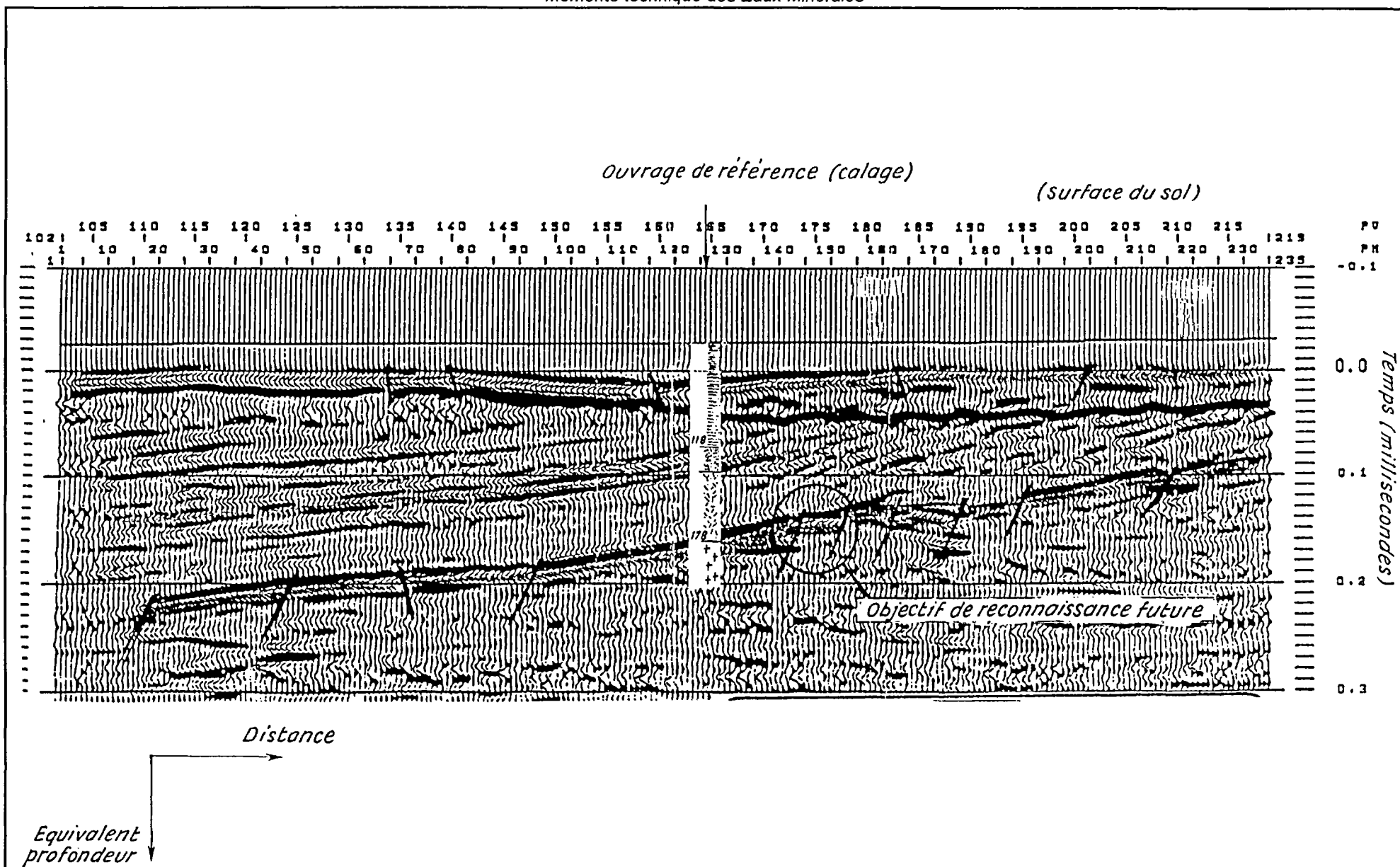
1. Le traitement des multiples données acquises sur le terrain nécessite des moyens informatiques extrêmement puissants pour "caler" au mieux l'ensemble des tirs réalisés le long du profil en restituant une "coupe sismique" unique.
2. L'analyse du résultat d'une prospection géophysique sismique requiert des ingénieurs géophysiciens spécialisés en sismique (un nombre restreint de sociétés dans le monde dispose d'une expérience significative, il s'agit en général de sociétés travaillant dans l'exploration pétrolière).
3. Le coût d'une campagne de mesure sismique est fonction de l'ampleur des mesures (nombre de profils et distances) outre l'amenée repli du matériel (non négligeable).

A titre d'exemple, la figure 2 présente le résultat d'une investigation sismique sur laquelle le spécialiste a surligné les discontinuités du sous-sol et dont l'hydrogéologue pourra tirer parti pour la compréhension du gisement étudié et l'implantation d'ouvrages de reconnaissance.

3.2 Les méthodes avec forages associés

Comme pour toute mesure géophysique, le forage associé permet de réaliser un calage plus précis compte-tenu de la connaissance acquise sur la lithologie lors de l'exécution du forage (coupe géologique).

En sismique, l'existence d'un forage permettra de réaliser des mesures dans le forage (à l'aide de géophones positionnés au droit de couches géologiques dûment repérées) et de préciser (par des tirs de surface) la vitesse de propagation "réelle" des ondes pour chacun des horizons. Le calage permettra ultérieurement d'affiner grandement l'interprétation d'un profil sismique tel que décrit ci-dessus.



Extrait document Compagnie Générale de Géophysique

Figure 2 - Exemple de résultat d'une investigation sismique Haute Résolution
(coupe de terrain restituée par traitement informatique)

On notera par ailleurs que l'existence de plusieurs forages permet de réaliser des mesures d'un ouvrage vers l'autre (1 ouvrage équipé de géophones, l'autre étant utilisé pour l'émission des vibrations le long de la verticale). Ce type de mesure peut renseigner utilement sur les discontinuités entre deux points (les forages) pour lesquels une corrélation de données géologiques implique l'existence d'un accident.

Ces mesures entre forages, appelées parfois "tomographie sismique" impliquent une concertation étroite entre les spécialistes de la géophysique et de la géologie pour une interprétation précise. Mise en oeuvre et interprétation restent délicates, pour des coûts élevés.

4. LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE

PRINCIPE :

Si la terre était homogène, parfaitement sphérique et, de plus, immobile dans un espace complètement vide, g (l'accélération de la pesanteur) serait la même sur toute sa surface. Or, en fait, g varie de façon très appréciable d'un point à un autre du globe terrestre.

La prospection gravimétrique consiste à mesurer les variations de l'accélération de la pesanteur puis à appliquer aux valeurs brutes un certain nombre de corrections pour éliminer l'influence des autres corps célestes, de la rotation et de la forme de la terre, afin de ne faire ressortir que les anomalies imputables seulement aux variations de densité du sous-sol.

APPLICATION :

L'application de la méthode gravimétrique suppose l'existence d'un contraste de densité entre les différentes unités géologiques ou entre une cible et son encaissant.

Selon les objectifs fixés, on distingue différents niveaux de précision des mesures in situ. Ainsi on parlera de "microgravimétrie" pour des études de sub-surface (<100 m) que l'on distinguera de la "gravimétrie au sol" pour des objectifs profonds.

La mise en oeuvre de la méthode nécessite une technicité particulière compte-tenu des corrections de mesures à réaliser en fonction de la topographie. Dans le cas de la microgravimétrie, la précision exigée quant à la topographie peut atteindre 1 cm, ce qui implique des coûts en conséquence.

RÉSULTAT :

Le résultat d'une prospection gravimétrique est l'établissement d'une carte de l'anomalie de Bouguer qui donne, en chaque point, la différence entre la valeur corrigée de g , relative au point considéré, et celle d'une station servant de référence pour l'ensemble de l'étude.

La carte de l'anomalie de Bouguer est influencée aussi bien par les anomalies de densité situées dans les terrains sédimentaires et d'extension relativement limitée que par celles affectant le socle cristallin ou cristallophyllien, et couvrant de très vastes étendues.

Le géophysicien procède à une individualisation des différentes "anomalies" par établissement d'une carte d'anomalie résiduelle. L'interprétation du résultat renseignera sur l'objectif fixé, sachant que la micro gravimétrie, dont la profondeur d'investigation est relativement faible (< 100 m), a pour domaine d'application la recherche de vides peu profonds plus ou moins remblayés ou inondés, la recherche de filon ou de zones fracturées, ou encore la recherche de zone karstiques et d'altération ou de zones d'alluvions.

La gravimétrie au sol concerne la mise en évidence de grandes structures géologiques (bassins, dômes, rides, graben ...).

5. LA MÉTHODE MAGNÉTIQUE

PRINCIPE :

Certaines roches ont une susceptibilité magnétique importante, et qui dépend dans une très large mesure de leur teneur en minéraux ferromagnétiques et principalement en magnétite et ilménite.

La prospection magnétique au sol (il existe des prospections aéroportées) a pour objet de mesurer les variations de la composante verticale du champ magnétique ou du champ total sur un secteur donné ou le long d'un profil donné.

APPLICATION :

Cette méthode peut parfois constituer une approche de départ pour préciser par exemple la position d'un filon ou d'une discontinuité sur un site avant de lancer des approches plus coûteuses et complexes. La mise en oeuvre de la méthode magnétique au sol ne nécessite qu'une équipe réduite (1 opérateur expérimenté, disposant d'un magnétomètre portable et d'un magnétomètre en station fixe pour correction des variations diurnes) pour l'obtention d'un profil ou d'une carte dont une interprétation sommaire qualitative, de base, est relativement facilement accessible. Pour une interprétation quantitative, la méthode nécessite un géophysicien averti.

RÉSULTAT :

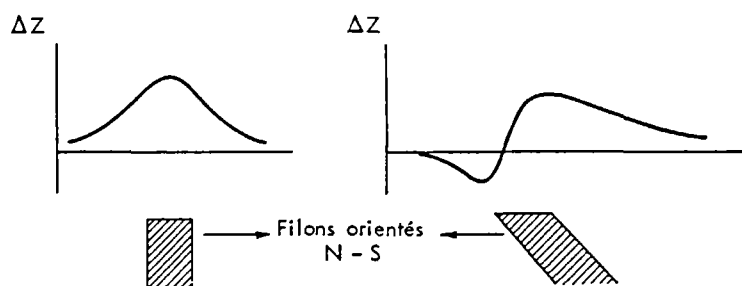
La méthode permet l'obtention d'anomalies magnétiques dont l'allure dépend certes de la susceptibilité magnétique des roches mais également de la forme, du volume et de la profondeur de l'accident ainsi que de l'orientation de ce dernier et des caractéristiques locales du champ terrestre.

A titre d'exemple, la figure 3 permet de visualiser le résultat de la variation de forme de l'anomalie magnétique liée à un filon ou à une sphère.

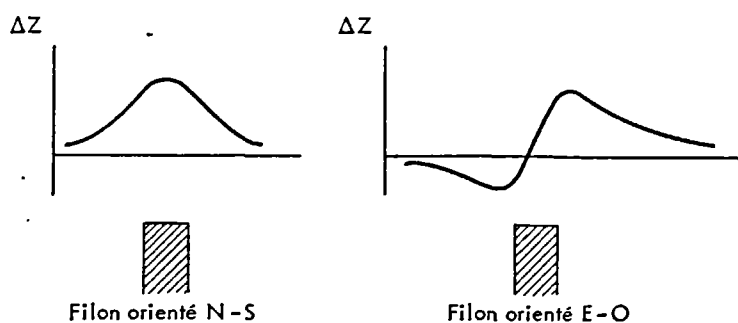
6. LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

6.1 V.L.F. Sol (Very Low Frequency)

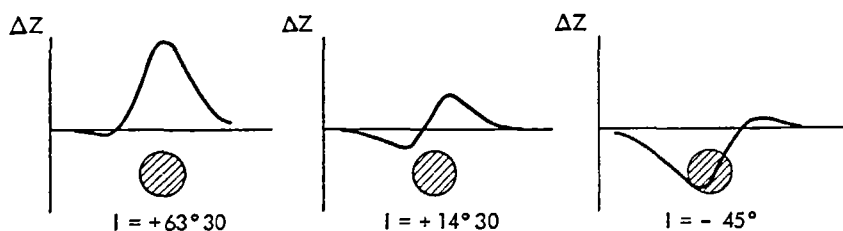
Il s'agit d'une méthode électromagnétique avec émetteur très éloigné.



— Influence du pendage d'un filon sur la forme de l'anomalie magnétique. (D'après LASFARGUES.)



— Influence de l'orientation d'un filon sur la forme de l'anomalie magnétique. (D'après LASFARGUES.)



— Influence de l'inclinaison du champ terrestre sur la forme de l'anomalie magnétique due à une sphère. (D'après H. HAALCK.)

Extrait du manuel "Géophysique appliquée à l'hydrogéologie"

Figure 3 - Exemple de réponses de profil magnétique (filon et sphère)

PRINCIPE :

Mesures de la composante magnétique d'un champ électromagnétique créé par des émetteurs "artificiels" (à destination des sous-marins dans la bande 8 - 25 kHz) et éventuellement du champ électrique. La mesure des deux paramètres champ électrique et magnétique permet de calculer une résistivité apparente, la mesure du champ magnétique seul peut être effectuée.

APPLICATION :

Recherche d'eau, analyse de discontinuité de résistivités (faille) dans le sous-sol le long d'un profil ou sur un secteur étudié (carte). La profondeur d'investigation est limitée (50 m au grand maximum).

L'application de la méthode nécessite l'existence d'un contraste de résistivité entre une cible (filon, fractures, ...) et l'encaissant.

RÉSULTAT :

Cartes et profils de résistivité ou de l'inclinaison du champ magnétique créés par une onde électromagnétique plane en provenance d'un émetteur lointain de direction et de fréquence connue (dans la bande VLF (8 - 25 kHz)).

6.2 Electromagnétisme à émetteur proche contrôlé

PRINCIPE :

Un champ électromagnétique de fréquence imposée est émis par un émetteur. Ce champ primaire (champ inducteur) est perturbé par la présence des conducteurs qui provoquent l'apparition de courants induits produisant un champ secondaire superposé au champ primaire.

La comparaison du champ magnétique total reçu par le récepteur et du champ primaire permet le calcul d'une conductivité apparente.

APPLICATION :

En hydrogéologie, recherche de l'épaisseur relative et de la continuité d'une zone de recouvrement argileux pour vérifier la protection d'un site.

RÉSULTAT :

Valeur de la conductivité pour une tranche de terrain dont l'épaisseur est fonction de l'appareillage (fréquence, distance émission-réception, configuration des bobines) et de la loi de conductivité du site étudié.

Mise en oeuvre et interprétation des méthodes électromagnétiques exposées ne nécessitent que des moyens relativement réduits (coût faible). L'intérêt de ces méthodes est axé sur la recherche de cibles minéralisées conductrices (intrusion conductrice ou veine minéralisée), avec un optimum d'efficacité quand le contraste est marqué entre cible et encaissant.

6.3 Résonance magnétique protonique (R.M.P.)

PRINCIPE :

Il s'agit de la mesure d'un champ magnétique créé par les protons de l'eau excités au préalable par un courant alternatif circulant dans une boucle à une fréquence adéquate.

Pour un sondage RMP, le paramètre modulable est la quantité d'excitation (produit de l'intensité du courant à la fréquence de résonance par la durée d'impulsion), la grandeur mesurée est le champ magnétique de relaxation créé par les protons excités et le paramètre physique que l'on cherche à déterminer est la teneur en eau des différentes couches du sous-sol.

APPLICATION :

En hydrogéologie, recherche de la présence d'eau donc localisation et caractérisation d'aquifère.

RÉSULTAT :

Détermination de la présence ou de l'absence d'eau. Appliquée à un milieu tubulaire (par rapport à la taille du dispositif) la méthode permet une localisation des niveaux aquifères avec détermination de la teneur en eau et estimation de la taille moyenne des pores pour chaque aquifère.

Nota : Méthode nouvelle mise au point par le service recherche du BRGM en collaboration avec une équipe de recherche russe. (cf biblio)

7. LES MÉTHODES DE PROSPECTIONS EN FORAGES

Les méthodes de prospections en forage consistent en la réalisation de mesures à l'aide d'une sonde descendue dans un forage (diagraphie).

Ces méthodes sont très variées. La présente note ne décrit que celles qui sont les plus fréquemment utilisées en hydrogéologie et dans le domaine des eaux minérales.

Le mise en oeuvre et le coût des mesures de diagraphie sont fonction principalement de la profondeur du forage (les ordres de grandeur présentés dans le tableau résumé peuvent être estimées relatives à des ouvrages n'excédant pas une centaine de mètres). L'interprétation nécessite le savoir-faire d'un géophysicien, l'acquisition des mesures requiert un opérateur qualifié et son laboratoire mobile d'enregistrement.

7.1 Diagraphies nucléaires

Les diagraphies nucléaires consistent à mesurer la radio-activité naturelle des couches traversées par un sondage ou à mesurer la réaction des couches à un rayonnement provoqué.

7.1.1 Diagraphie gamma-ray naturel

PRINCIPE :

Mesure quantitative, en continu (en nombre de coups par seconde) et en fonction de la profondeur, de la radioactivité naturelle des matériaux traversés par un forage. La mesure est réalisée au moyen d'une sonde possédant un compteur à scintillation.

APPLICATION :

Très général : mise en évidence de terrains présentant des contrastes de radioactivité naturelle (argile, granite). Pour son application on doit disposer de forages tubés ou non, noyés ou secs (pas d'interdit d'application).

RÉSULTAT :

Enregistrement de la radioactivité naturelle des terrains traversés par le forage et interprétation géologique.

7.1.2 Diagraphie gamma-ray sélectif

PRINCIPE :

Mesure quantitative (en nombre de coups par seconde, en continu et en fonction de la profondeur, de la radioactivité naturelle des matériaux traversés par un forage. La mesure est faite au moyen d'une sonde possédant un compteur à scintillation. Le rayonnement est analysé dans au moins deux bandes spectrales caractéristiques qui permettent de distinguer la radioactivité émise par les familles radioactives des éléments Uranium, Thorium et Potassium.

APPLICATION :

Très général : mise en évidence de terrains présentant des contrastes de radioactivité naturelle avec identification lithologique plus précise que celle obtenue par le gamma ray naturel : distinction entre différents types d'argiles ou de granites.

L'application de la méthode nécessite de disposer de forages tubés ou non, noyés ou secs (pas d'interdit d'application).

RÉSULTAT :

Enregistrement dans différentes bandes spectrales de la radioactivité naturelle des terrains traversés par le forage et interprétation lithologique.

7.1.3 Diagraphie neutron-neutron

PRINCIPE :

On utilise le phénomène du ralentissement des neutrons rapides par les noyaux des atomes constitutifs du milieu jusqu'à une limite correspondant à l'énergie d'agitation thermique du milieu (d'où l'appellation neutrons thermiques). Les neutrons rapides sont émis par une source d'Américium Béryllium (ou équivalent). La mesure du flux des neutrons thermiques (en cps) est très sensible à la teneur en hydrogène du milieu.

APPLICATION :

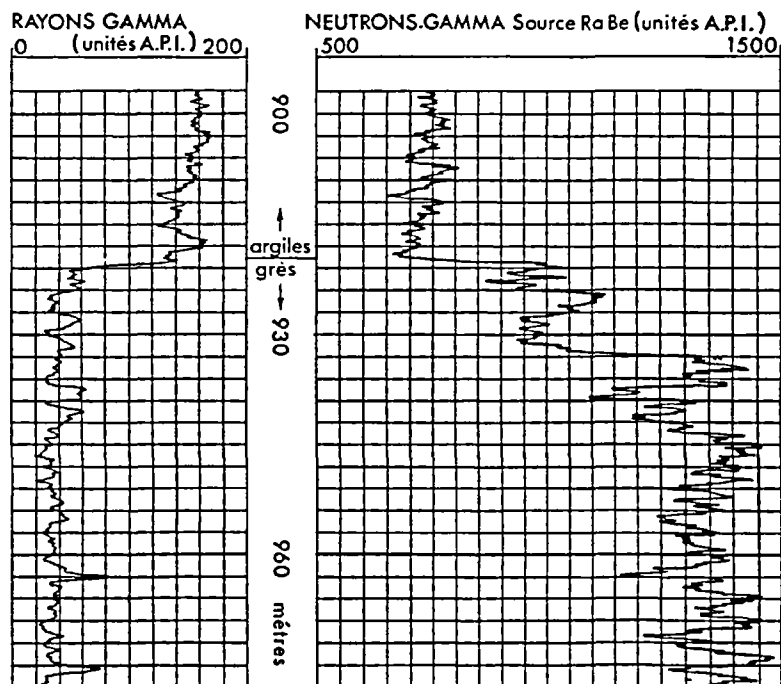
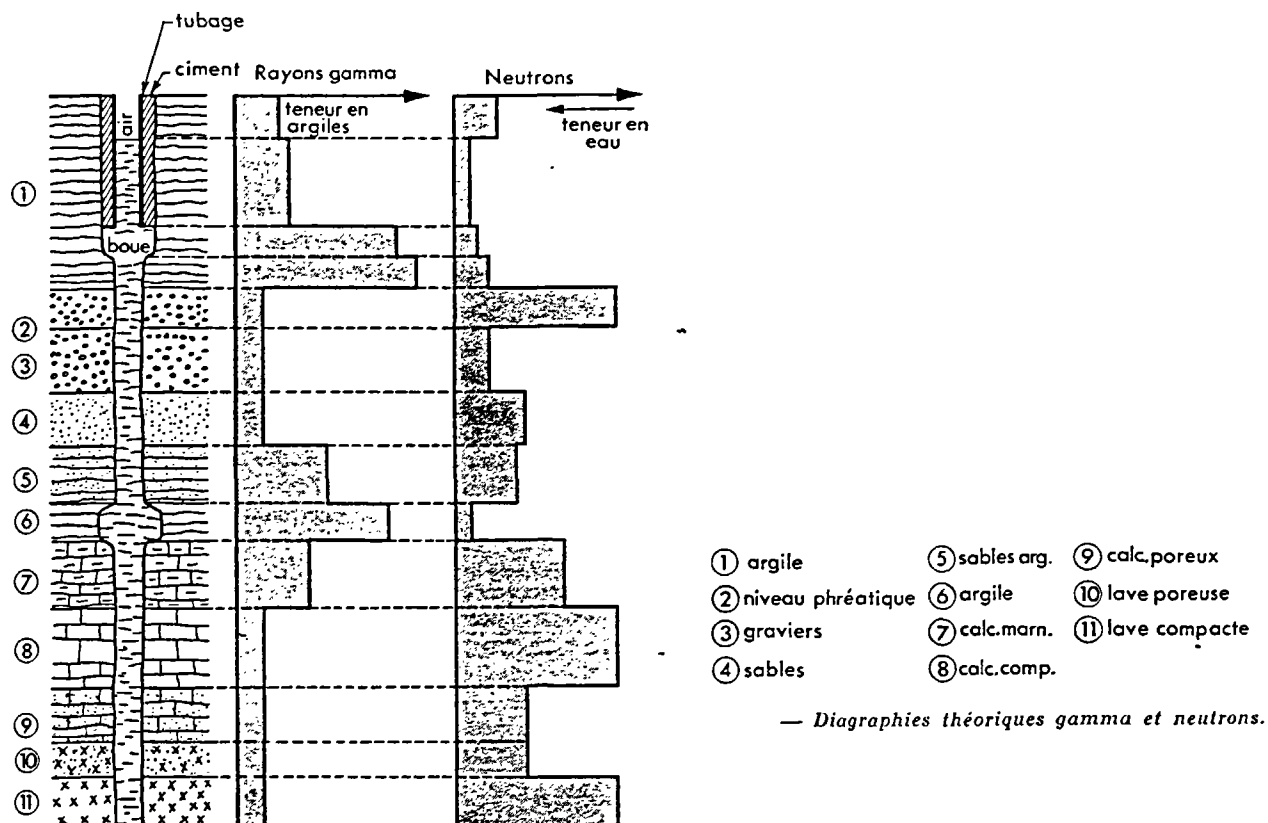
Hydrogéologie (teneur en eau des terrains).

L'application de la méthode nécessite de disposer de forages en trou nu ou tubés, noyé ou sec. (obligation légale de retirer la sonde du forage d'où interdit d'application avec une mauvaise tenue de la paroi du forage).

RÉSULTAT :

Enregistrement des variations qualitatives des teneurs en eau volumiques en fonction de la profondeur. Option : détermination de la teneur en eau moyennant une double calibration sur dalles de référence et échantillons de sols prélevés sur le site.

A titre d'exemple la figure 4 illustre une réponse de diagraphie gamma et neutron.



— Sondage J. Diagraphies gamma et neutrons. (Document WELEX.)
Grès situés entre 933 et 975 mètres: radio-activité neutrons: 1 325 unités A.P.I.;

Extrait du manuel "Géophysique appliquée à l'hydrogéologie"

Figure 4 - Exemple de réponse d'une diagraphie gamma et neutron

7.2 Diagraphies électriques

7.2.1 Diagraphie Polarisation Spontanée (PS)

PRINCIPE :

Mesure de la différence de potentiel naturelle entre une électrode de référence fixe, placée en surface, et une électrode mobile qui parcourt toute la longueur du forage.

APPLICATION :

Reconnaitances hydrogéologiques générales : lithologie, fracturation, porosité, qualité des eaux, circulation d'eaux.

Pour sa mise en oeuvre, on doit disposer de forages non tubés et remplis de fluide conducteur (eau, boue), ou tubés plastique fortement crépiné.

RÉSULTAT :

Enregistrement en continu d'une différence de potentiel naturelle, exprimée en millivolts, en fonction de la profondeur dans le forage.

7.2.2 Imagerie électrique

PRINCIPE :

Un dispositif d'électrodes (boutons) installées à la même profondeur sur un ou plusieurs patins déplaçables destinés à être appliqués contre la paroi du forage permet une évaluation très locale des propriétés électriques de la formation (Résistance de prise).

Au cours du déplacement de l'outil autant de signaux que de boutons seront enregistrés, assortis de la profondeur et de l'azimut des patins nécessaires au positionnement de l'image dans l'espace.

APPLICATION :

Géologie de détail : visualisation des structures sédimentaires, visualisation et orientation des fractures naturelles ou induites, estimation de l'épaisseur de ces fractures.

Application à des forages nus remplis d'eau ou de boue permettant le passage du courant électrique.

RÉSULTAT :

Image orientée visualisant les variations locales de résistivité à la surface de la paroi du forage.

7.3 Diagraphies acoustiques

7.3.1 Diagraphie sismique

PRINCIPE :

Mesure en continu de la vitesse sismique dans un forage noyé au moyen d'une sonde comportant au moins une source et deux récepteurs.

APPLICATION :

Hydrogéologie : estimation de la porosité. Stratigraphie. Contrôle des coupes temps en sismique. Fracturation.

L'application de la méthode nécessite de disposer de forages noyés - non tubés. La vitesse des ondes dans les terrains doit être supérieure à la vitesse dans le fluide de forage.

RÉSULTAT :

Diagraphie et vitesse sismique (onde ou compression) ou d'un Δt (écart de temps d'arrivée) sur un intervalle fixe.

7.3.2 Imagerie acoustique

PRINCIPE :

Auscultation de la circonférence du forage à l'aide d'un faisceau d'ultra-sons dont on recueille les rayons réfléchis sur la paroi. Le temps de trajet aller-retour (sonde centrée - parois - sonde centrée) varie avec la géométrie du forage ; l'amplitude du signal dépend de la réflectivité acoustique des matériaux de la paroi.

APPLICATION ;

Analyse géologique de détail : étude de la structure des formations ; étude de la fracturation (trou nu).

Caractérisation technique du forage : évaluation de cimentation, étude de la corrosion de tubage.

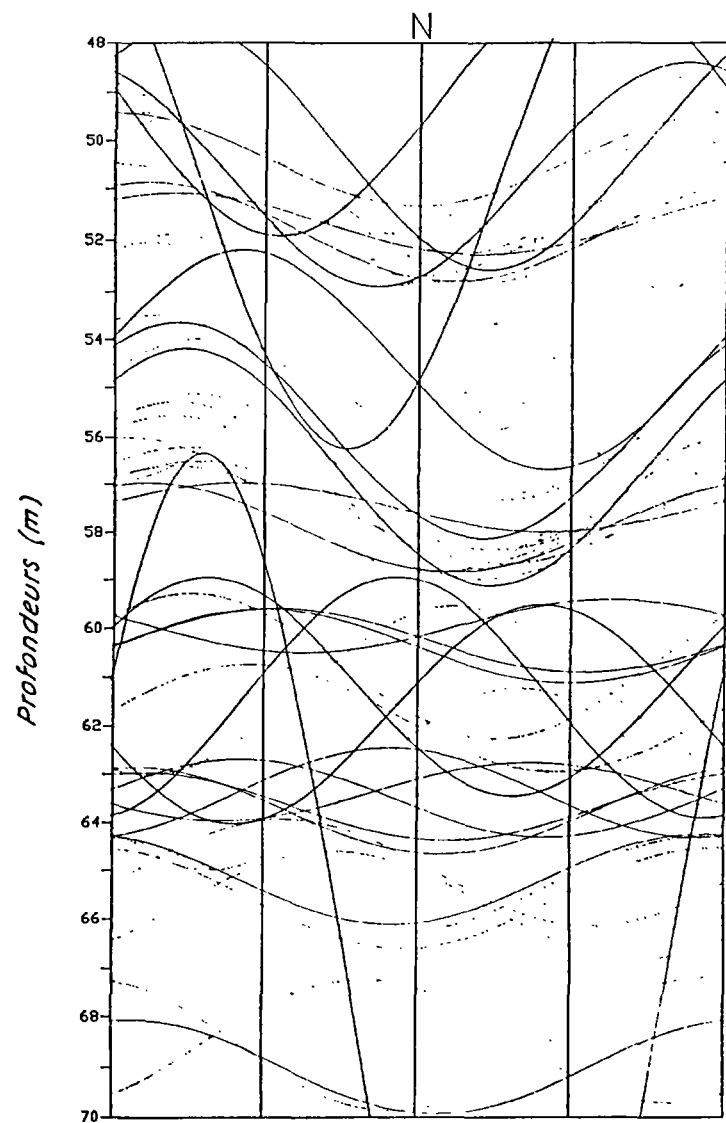
Pour son application, il faut disposer de forages remplis de fluide (eau claire) pour lesquels existent des contrastes de réflectivité, aux ondes ultra soniques, à l'interface fluide-roche.

RÉSULTAT :

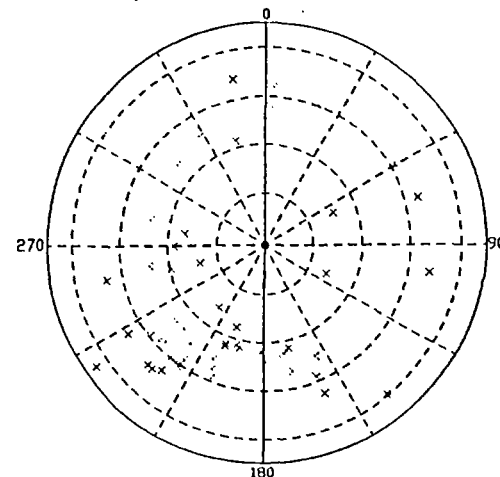
Image orientée et déroulée visualisant l'amplitude et parfois le temps de trajet du signal réfléchi sur la paroi du forage.

Pour illustration, la figure 5 présente une mesure d'orientation des fractures par imagerie acoustique, sachant que l'interprétation nécessite la compétence d'un spécialiste. (système dit BHTV : Bore Hole Tele Viewer).

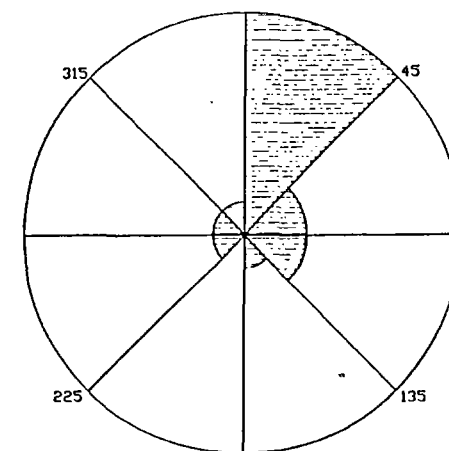
Nota : Outre le domaine des diagraphies nucléaires, électriques et soniques propres à l'environnement hydrogéologique d'un forage, dont les plus utilisées ont été sommairement décrites ci-dessus, il existe un domaine dit des "diagraphies techniques", plus spécifique au forage lui-même ou au fluide lié, dont la mise en oeuvre implique des moyens plus légers. On citera les mesures de débitimétrie, de température ou de résistivité liées au fluide. On citera également les mesures de diamètre, de trajectoire ou de cimentation liées au forage proprement dit. On citera enfin la "caméra vidéo en forage" qui constitue un bon moyen de visualiser et de valider (réception d'ouvrage exécuté) une réalisation.



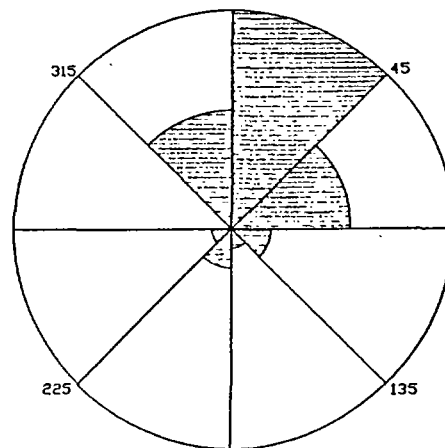
Restitution graphique des mesures



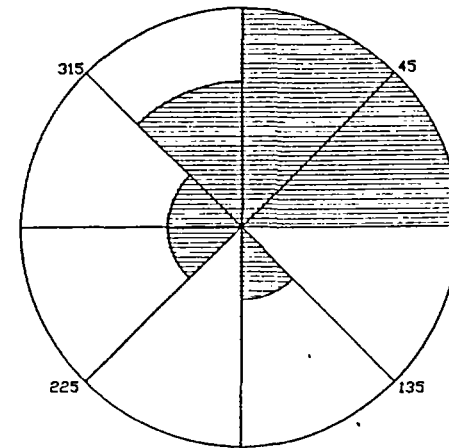
Azimuts des fractures



CLASSE 1 NMAX = 7



CLASSE 2 NMAX = 11



CLASSE 3 NMAX = 3

Direction des fractures selon les pentages (3 classes)

Extrait document Compagnie EGS

Figure 5 - Exemple de résultat d'une investigation type "imagerie acoustique"

8. CONCLUSIONS

La prospection géophysique dispose d'une panoplie très large pour la reconnaissance "indirecte" des caractéristiques hydrogéologiques d'un site. Chaque méthode est et doit être adaptée au problème posé et aux contraintes inhérentes au projet concerné (conditions d'accès au terrain, spécificité géologique, ...).

La valorisation des données acquises lors des reconnaissance géophysiques sera toujours optimisée par "calage" avec les données issue d'une reconnaissance "directe" (forage) par laquelle la lithologie des terrains en jeu aura été déterminée.

Quelles que soient la technicité et l'importance des méthodes employées, il convient de ne pas oublier que toute reconnaissance hydrogéologique nécessite une forte concertation entre domaines de compétence distincts (géophysicien, géologue, hydrogéologue, structuraliste,). Ainsi la prospection géophysique doit être considérée dans un contexte général comme un moyen très performant certes mais nécessairement corrélé à d'autres pour être totalement efficace.

BIBLIOGRAPHIE

- **Géophysique appliquée à l'Hydrogéologie** - J.L. ASTIER - Editions Mars 1971
- **Code de bonne pratique - Géophysique appliquée** - Mars 1992 diffusé par l'UFG (Union Française des Géologues) - 77 rue Claude Bernard - Paris 75005
- **Hydrogéologie N° 1 1996** : "Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques : l'application de la résonance magnétique nucléaire" - pp 71-77 - A. Beauce, J. Bernard, A. Legchenko, P. Valla (BRGM/IRIS instrument/ICKC Russian Academy of Science)
- **Sismique Haute Résolution : Acquisition, traitement, interprétation, exemples** - Document Compagnie Générale de Géophysique



Les eaux minérales et le gaz carbonique

Note technique n° 10

Octobre 1997

R É S U M É

Derrière la notion d'eau minérale gazeuse se cache une réalité complexe faite d'une somme de problèmes particuliers liés à l'instabilité des équilibres calcocarboniques et à leur sensibilité aux variations de température et de pression et donc, aux conditions d'exploitation qu'on leur impose.

A partir d'une documentation très générale, et souvent tournée vers les problèmes de distribution d'eau potable, cette note tente de faire le point sur un certain nombre d'interrogations parmi les plus courantes, liées aux eaux minérales.

La liste des questions traitées ne prétend pas être exhaustive et pourrait le cas échéant être complétée.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. DÉFINITION DES EAUX MINÉRALES GAZEUSES	1
3. RÉPARTITION DES ÉMANATIONS IMPORTANTES DE CO₂ EN FRANCE (fig. 1)	2
4. AUTRES ORIGINES DU GAZ CARBONIQUE DANS LES EAUX SOUTERRAINES	2
5. LE SYSTÈME CARBONATE : RAPPELS THÉORIQUES	3
5.1 Equilibres entre espèces dissoutes	4
5.2 Equilibre entre gaz et solution	4
5.3 Equilibre entre minéraux et solution	5
5.4 Distribution du CO ₂ dans l'eau	5
5.5 Valeurs de la pression partielle de CO ₂ dans la nature	6
5.5.1 Dans l'atmosphère	6
5.5.2 Dans le sol	7
5.5.3 Dans le sous-sol	7
5.6 Alcalinité	7
6. DÉGAZAGE, OXYDATION ET REGAZAGE D'UNE EAU MINÉRALE	8
6.1 Exemple de la deferrisation	8
6.2 Dégazage/regazage	8
7. RAPPORT GAZ/EAU ET POINT DE BULLE	9
8. MÉTROLOGIE DANS LES FORAGES D'EAUX GAZEUSES	10
9. LES MESURES DE CO₂ LIBRE À L'ÉMERGENCE	11
10. MESURE DU VOLUME DES GAZ DISSOUS	11
11. CONCLUSION	12
BIBLIOGRAPHIE	13

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Répartition des émanations importantes de CO₂ en France

Fig. 2 : Echanges dans le système carbonate

Fig. 3 : Neutralisation de l'eau alcaline avec H₂SO₄

Fig. 4 : Solubilité du CO₂ et de O₂ dans l'eau

Fig. 5 : Exemple de courbe Pression/Volume

Fig. 6 : Evolution du volume gazeux en fonction de la profondeur

Fig. 7 : Evolution du pH en fonction de la profondeur

Fig. 8 : Evolution de l'équilibre chimique vis à vis des carbonates

ANNEXE

- Notice de l'appareil KARAT

I. INTRODUCTION

L'eau couvre environ 70 % de la surface terrestre et possède donc une surface de contact extrêmement étendue avec les autres phases en présence :

- phase gazeuse (atmosphère)
- phase solide (roches)

La chimie des eaux naturelles est régie par les échanges de matière à ces deux interfaces, qui sont dus aux capacités de solvant, importantes, de l'eau.

Ces échanges sont les échanges gazeux à l'interface entre hydrosphère et atmosphère et les dissolutions, précipitations, adsorptions et désorptions à l'interface entre hydrosphère et lithosphère. Le sens et la rapidité des échanges sont conditionnés par des paramètres chimiques "internes" essentiellement la composition chimique de chacun des milieux en contact, mais aussi par deux paramètres physiques "externes" qui sont la température et la pression.

Dans le cas qui nous occupe, les eaux minérales gazeuses, la minéralisation de l'eau sera presque exclusivement gouvernée par l'ensemble des réactions d'équilibre acido-basique impliquant les espèces dérivées de la dissolution dans l'eau du CO₂ gazeux et les espèces dissoutes provenant de la réaction entre cette eau et les roches.

Cet ensemble de réactions est en général appelé le système carbonate.

2. DÉFINITION DES EAUX MINÉRALES GAZEUSES

"Les eaux minérales naturelles effervescentes dégagent, à l'origine ou après embouteillage, spontanément et de façon nettement perceptible, du gaz carbonique dans les conditions normales de température et de pression."

(DIRECTIVE CEE N° 80/777 DU 15 JUILLET 1980 - ANNEXE 1)

Cette même directive limite l'usage de la mention "acidulée" aux eaux contenant plus de 250 mg/l de CO₂ libre.

Dans le projet de normes du Codex Alimentarius, on trouve la définition suivante :

Une "eau minérale naturelle naturellement gazeuse" est une eau minérale naturelle dont la teneur en gaz carbonique est,, la même qu'à l'émergence. Il s'agit du gaz carbonique spontanément et visiblement dégagé dans des conditions normales de température et de pression.

A contrario :

Une “eau minérale naturelle non gazeuse” est une eau minérale naturelle qui, à l'état naturel et après traitement éventuel conformément à la Section 3.1.1 et conditionnement, compte-tenu des tolérances techniques usuelles, ne contient pas de gaz carbonique libre en proportion supérieure à la quantité nécessaire pour maintenir dissous les sels hydrogéo-carbonatés présents dans l'eau.

Ces quatre énoncés illustrent l'embarras du législateur qui est le reflet des problèmes particuliers posés par les eaux gazeuses.

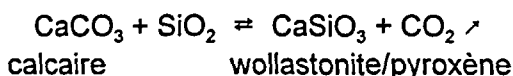
3. RÉPARTITION DES ÉMANATIONS IMPORTANTES DE CO₂ EN FRANCE (Fig.1)

A la suite de l'orogénèse alpine et de l'ouverture de la Méditerranée, les failles méridiennes des fossés d'effondrement du Massif Central et les grandes lignes de fractures de direction cévenole (NE-SW), ont joué en distension à partir du Tertiaire. Elles affectent le socle cristallin, et ont favorisé la mise en place du volcanisme du Centre et du Sud Est de la France au Massif Central français. Elles permettent encore la remontée actuelle de CO₂ d'origine magmatique, formant la province des eaux bicarbonatées sodiques du Massif Central.

Toutefois cette province carbogazeuse du Massif Central fait partie d'une plus grande province carbogazeuse, d'extension périalpine, qui prend la France en écharpe du Roussillon jusqu'à l'Alsace. Elle intéresse des zones cristallines, l'extrémité orientale de la chaîne axiale pyrénéenne et les Vosges, avec des eaux au profil bicarbonaté sodique, comme des zones à recouvrement sédimentaire, le Languedoc, la vallée du Rhône et les chaînes subalpines avec des eaux à profil bicarbonaté calcique.

4. AUTRES ORIGINES DU GAZ CARBONIQUE DANS LES EAUX SOUTERRAINES

Hormis l'origine magmatique qui vient d'être évoquée, on mentionne également l'existence de CO₂ d'origine profonde, produit par métamorphisme des formations carbonatées, notamment à la périphérie des provinces volcaniques ; le dégagement de CO₂ serait produit par des réactions de type,



Ces dégagements de gaz peuvent soit remonter directement jusqu'en surface sans relais ni stockage intermédiaire, soit être piégés dans des horizons intermédiaires (couches de charbon) ou des aquifères captifs de nature calcaire.

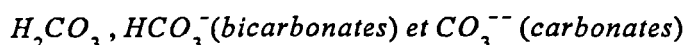
Enfin, le CO₂ peut être d'origine biogénique : dans les horizons superficiels, l'activité biologique de la faune et de la flore peut contribuer localement à la création de pressions partielles de CO₂ dans les sols excédant nettement la pression de CO₂ atmosphérique (voir plus loin).

Ces différentes origines peuvent être caractérisées par l'analyse de la teneur en ^{13}C du Carbone.

5. LE SYSTÈME CARBONATE : RAPPELS THÉORIQUES

C'est l'ensemble formé par trois types de composés chimiques, qui sont :

- dans l'atmosphère : le gaz carbonique (CO_2) ;
- dans l'eau : les composés de l'acide carbonique :



- dans les roches : les minéraux carbonatés (surtout calcite, CaCO_3 , et dolomite, $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$).

NB : Dans les textes officiels, on utilise généralement le terme hydrogénocarbonates au lieu de bicarbonates

Ces divers composés sont en relation, comme l'indique la figure 2. Au contact entre eau et atmosphère, il peut y avoir dissolution ou dégazage de gaz carbonique. Au contact entre eau et roches, il peut se produire une dissolution ou une précipitation de calcite - par exemple -. C'est en ce sens que l'on peut définir l'ensemble de ces composés comme un système, puisque toute modification de l'un des termes entraîne des variations de chacun des autres.

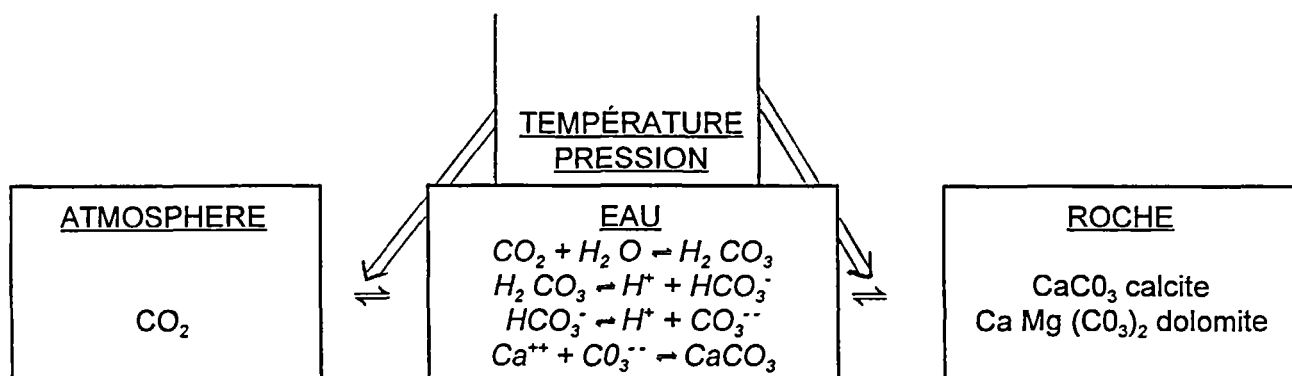
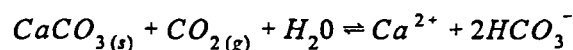


Fig. 2 : Echanges dans le "système carbonate"

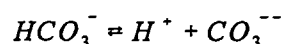
Cet ensemble de réactions, étroitement dépendant des conditions de température et de pression, peut être résumé par la réaction de dissolution de la calcite au contact d'une eau chargée en gaz carbonique.



Chacune des réactions de la figure 2 sont des réactions réversibles pour lesquelles on peut définir des états d'équilibre (constantes d'équilibre des réactions).

5.1 Equilibres entre espèces dissoutes

En prenant l'exemple de la réaction entre bicarbonate et carbonate dissous :



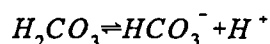
on peut définir l'équilibre par la relation :

$$K_2 = \frac{(H^+)(CO_3^{--})}{(HCO_3^-)}$$

dans laquelle K_2 est la constante d'acidité de l'ion bicarbonate, et où les parenthèses symbolisent l'activité des différents ions impliqués dans la réaction. La constante K_2 ne dépend que de la température et - très faiblement pour cette réaction - de la pression.

N.B. : L'activité d'un ion est le produit de sa concentration par un coefficient correcteur dépendant de la minéralisation totale de l'eau. Pour des eaux peu minéralisées, ce coefficient est proche de 1 et on peut assimiler activité et concentration.

De même, on peut définir K_1 , constante de l'acide carbonique, qui correspond à la réaction :



et s'écrit :

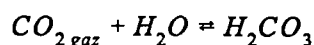
$$K_1 = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(H_2CO_3)}$$

K_1 et K_2 sont les deux paramètres caractéristiques des relations entre pH et espèces carbonatées dissoutes.

Les réactions homogènes telles que les deux exemples cités sont des réactions très rapides. L'équilibre s'établit très généralement en quelques fractions de secondes. On peut considérer notamment dans les eaux souterraines, que toutes les réactions en phase liquide sont en permanence à l'équilibre.

5.2 Equilibre entre gaz et solution

On peut définir un état d'équilibre de la réaction :



par la constante de Henry pour le gaz carbonique. Celle-ci s'écrit :

$$K_{H_{CO_2}} = \frac{(H_2CO_3)}{pCO_2}$$

où pCO_2 représente la pression partielle du CO_2 dans le milieu gazeux avec lequel l'eau est en contact, et (H_2CO_3) l'activité de l'acide carbonique en solution. La constante de Henry, K_H dépend, là encore, de la température mais aussi de la pression totale. Si une eau est en équilibre avec un gaz (atmosphère libre, gaz du sol, etc...) de pression partielle de CO_2 donnée, l'activité de l'acide carbonique dans la solution est donc fixée.

Les vitesses de dissolution ou de dégazage sont très variables selon le gaz considéré. Le gaz carbonique se dissout dans l'eau pour atteindre un équilibre en quelques heures. D'autres facteurs comme la température, la pression, le pH et la minéralisation de l'eau, influent sur cette cinétique. Les réactions d'échange entre phase gazeuse et phase liquide sont généralement plus lentes que les réactions homogènes en phase liquide.

5.3 Equilibre entre minéraux et solution

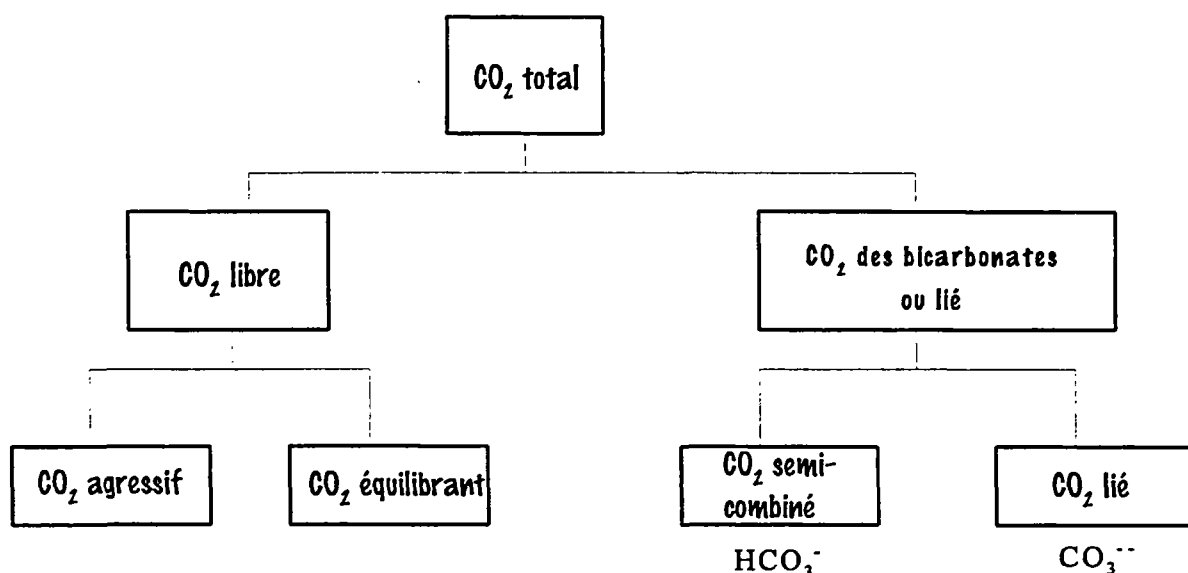
L'équilibre entre la calcite et une eau se définit par le produit de solubilité de la calcite. Celui-ci s'écrit :

$$K_{S_{CaCO_3}} = (Ca^{++}) (CO_3^{--}),$$

c'est-à-dire qu'à l'équilibre avec la calcite, le produit des activités des ions en solution susceptibles de former le minéral est une constante. Ici encore, la constante - le produit de solubilité - dépend uniquement de la température et de la pression.

De même que pour les réactions hétérogènes entre gaz et solution, la précipitation et la dissolution d'un minéral sont des réactions plus lentes que les réactions homogènes en solution.

5.4 Distribution du CO₂ dans l'eau



Elle est classiquement schématisée ainsi :

Dans ce schéma :

- CO₂ total représente la somme des espèces carbonatées :

CO₂ dissous moléculaire (pour mémoire)
et H₂CO₃
HCO₃⁻
CO₃⁻⁻

- CO₂ libre est la somme de :

CO₂ dissous moléculaire à l'état de microbulles et H₂CO₃, c'est-à-dire en fait le CO₂ "dissous".

- CO₂ des bicarbonates (ou lié) est la somme de :



- Les notions de CO₂ équilibrant et agressif sont des concepts dérivés de l'industrie de distribution de l'eau :

- le CO₂ libre équilibrant est la fraction de CO₂ dissous (non combiné en HCO₃⁻ ou CO₃⁻⁻) juste nécessaire pour qu'il n'y ait ni dissolution ni précipitation de carbonate de calcium (équilibre).
- le CO₂ libre agressif est la fraction de CO₂ dissous présente dans l'eau en excès par rapport au CO₂ équilibrant et qui confère à l'eau son caractère agressif (risques de corrosion).

Ainsi, si l'on s'en tient aux définitions citées dans le § II, une eau minérale gazeuse est une eau contenant du CO₂ libre agressif.

5.5 Valeurs de la pression partielle de CO₂ dans la nature

5.5.1 Dans l'atmosphère

Elle était à la fin des années 1970 de 2×10^{-4} atm.

Vingt ans plus tard, du fait de l'évolution des activités humaines (effet de serre) elle est en moyenne de $3,4 \times 10^{-4}$ atm.

L'équilibre : $CO_{2 \text{ gaz}} + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$

est réglé par la constante de Henry dont la valeur est :

$$K_H = \frac{(H_2CO_3)}{pCO_2} = 10^{-1,46}$$

à 25° et 1 atm.

- Cette constante varie avec la température suivant l'expression empirique :

$$- \log K_H = 1,46 + 0,0127 (t-25)$$

avec t en ° Celsius

- Notons que l'activité (H₂CO₃) représente en fait :

- la molécule H₂CO₃ vraie (acide carbonique)
- et le CO₂ dissous moléculaire présent à l'état de microbulles.

Par conséquent, dans une eau de surface à 25°C on aura :

$$\begin{aligned}(\text{H}_2\text{CO}_3) &= K_H \cdot p\text{CO}_2 \\ &= 10^{-1,46} \times 3,4 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ mole/kg soit } 0,53 \text{ mg de CO}_2 \text{ libre par litre d'eau.}\end{aligned}$$

5.5.2 Dans le sol

La phase gazeuse est très enrichie en CO₂ par les phénomènes de respiration de la faune et de la flore ; la pression partielle de CO₂ est relativement stable autour d'une valeur voisine de 0,1 atm. Le même calcul que précédemment donne une concentration en CO₂ libre de 150 mg par litre d'eau.

Cette valeur est à comparer au seuil de 250 mg/l de CO₂ libre retenu dans les définitions du § 2 ; une eau minérale gazeuse est donc nécessairement associée à un apport de CO₂ autre que biogénique.

5.5.3 Dans le sous-sol

Dans les régions définies au § III, des pressions de CO₂ de plusieurs dizaines d'atmosphères ont été rencontrées en profondeur.

5.6 Alcalinité

Une solution aqueuse est électriquement neutre : la somme des charges des ions positifs doit contrebalancer la somme des charges des ions négatifs. Une solution naturelle contient principalement les ions Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻. Les concentrations de ces ions ne sont pas indépendantes et doivent vérifier l'équation d'électroneutralité :

$$(H^+) + (Na^+) + (K^+) + 2(Mg^{2+}) + 2(Ca^{2+}) = (Cl^-) + 2(SO_4^{2-}) + (HCO_3^-) + (OH^-)$$

On peut la réordonner en :

$$(Na^+) + (K^+) + 2(Ca^{2+}) + 2(Mg^{2+}) - (Cl^-) - 2(SO_4^{2-}) = (HCO_3^-) + 2(CO_3^{--}) + (OH^-) - (H^+)$$

Dans le 1^{er} terme de l'équation (appelé réserve alcaline), on regroupe tous les composés "inactifs" de l'eau (sans propriétés acido-basiques, non concernés par des variations de pH, de température ou de pression).

Le second terme regroupe, quant à lui, les bases et acides actifs : il constitue l'alcalinité totale (T.A.C.).

Le dosage de l'alcalinité de l'eau, somme des concentrations des espèces du second membre de l'équation, se fait par colorimétrie ou potentiométrie en présence d'un acide fort (HCl ou H₂SO₄) (fig. 3).

On détermine ainsi :

- le T.A. (titre alcalimétrique, virage à la phénolphtaléine) oxhydriles et demi-somme des carbonates.
- le TAC (titre alcalimétrique complet, virage au méthylorange) somme des oxhydriles carbonates et bicarbonates.

N.B. : La concentration en OH⁻ est négligeable face à la concentration en espèces carbonatées et dans la plupart des eaux naturelles (6 < pH < 8) le T.A.C. correspond en première approximation à la teneur en bicarbonates.

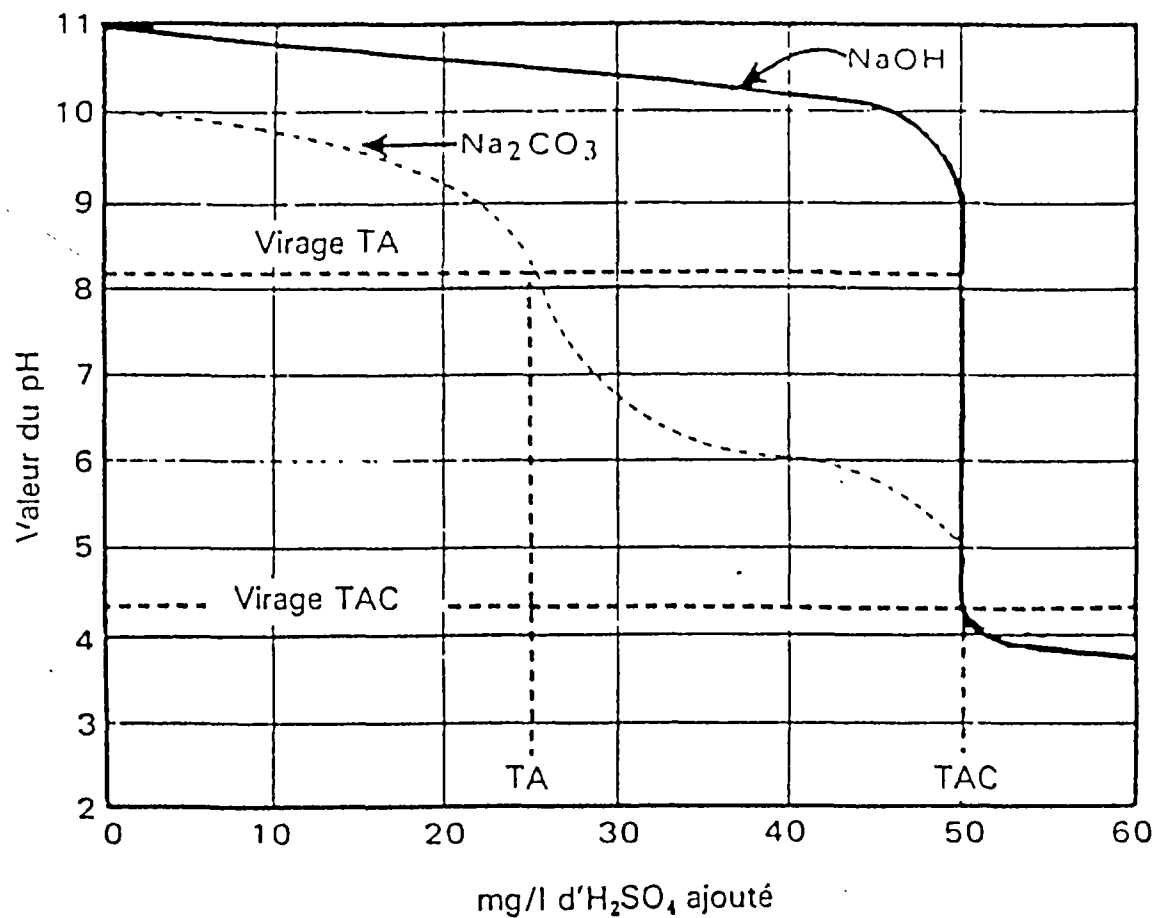


Figure 3 - Neutralisation de l'eau alcaline avec H_2SO_4 (en supposant une alcalinité totale de 50 mg/l)

unité d'alcalinité

T.A. et T.A.C. sont généralement exprimés en ° Français :

1°F = 12,2 mg/l HCO₃⁻

N.B. : Dans certaines conditions, ou pour certaines eaux particulières, d'autres espèces actives, en plus du système carbonate, peuvent intervenir dans la détermination de l'alcalinité totale ; ce sont :

- les sulfures
- les borates (eau de mer)
- les silicates (eaux sulfurées basiques)
- l'ammonium et les phosphates (eaux dépourvues d'oxygène)

6. DÉGAZAGE, OXYDATION ET REGAZAGE D'UNE EAU MINÉRALE

6.1 Exemple de la deferrisation

Dans son application la plus simple, la déferrisation par oxydation à l'air libre consiste à chasser le CO₂ libre de l'eau par brassage mécanique.

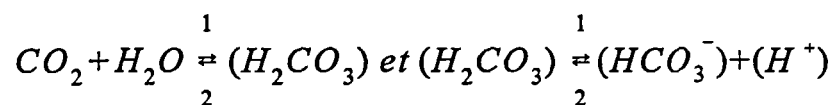
Ce faisant, l'équilibre carbonique est modifié ; l'eau, en équilibre avec une pression partielle de CO₂ importante dans le sous-sol, va s'équilibrer avec la pression partielle de CO₂ atmosphérique et la pression partielle d'oxygène de l'air. Cet oxygène dissous permettra l'oxydation plus ou moins rapide du fer.

6.2 Dégazage/regazage

Après décantation et élimination de l'hydroxyde ainsi formé, l'industriel procède à la regazéification à la pression partielle de CO₂ choisie, souvent égale ou supérieure à la pression partielle de CO₂ à l'émergence, en tenant compte des contraintes réglementaires en termes d'étiquetage.

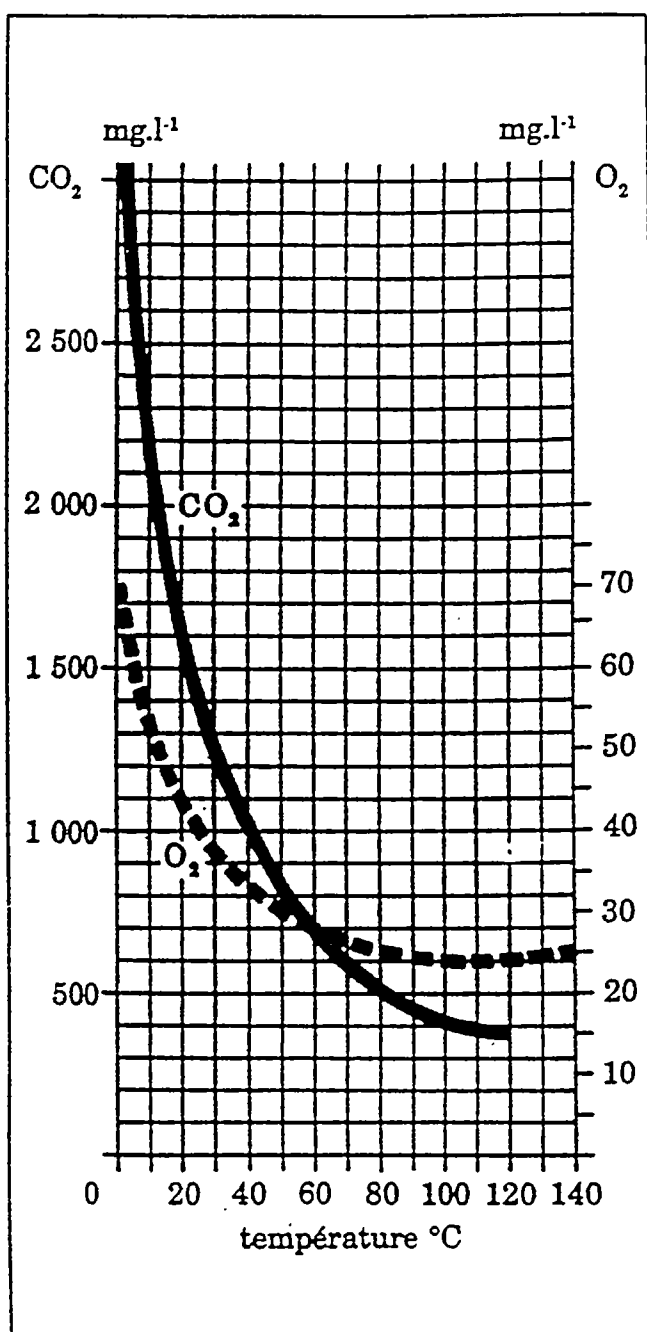
- Cette opération se réalise à des pressions de l'ordre de 1 bar sous atmosphère de CO₂ mais souvent à basse température (4 à 5°C) en profitant de la solubilité accrue du CO₂ (fig. 4).

Au cours de ces opérations les équilibres réversibles :



se déplacent dans le sens 2 au moment du dégazage puis dans le sens 1 lors du regazage.

Ainsi également, à chaque fois que l'on ouvrira une bouteille d'eau gazeuse pour en déguster le contenu, ces équilibres se déplaceront dans le sens 2.



Solubilité de CO₂ et O₂ dans l'eau en mg.l⁻¹ de gaz par litre d'eau à la pression atmosphérique et sous atmosphère de gaz pur

Figure 4 - Solubilité de CO₂ et O₂ dans l'eau

7. RAPPORT GAZ/EAU ET POINT DE BULLE

La constante de Henry est également dépendante de la pression totale ; une eau souterraine contenant du CO₂ dissous va donc évoluer lors de la dépressurisation induite par exemple par le captage par forage : elle va dégazer.

Les premières mesures de rapport gaz/liquide (GLR) et de point de bulle, ont été mises au point par les compagnies pétrolières, au moyen de chambres (Pression/Volume/Température), permettant de mesurer l'accroissement de volume d'un échantillon de fluide, en fonction de la baisse de pression, à température constante.

Les courbes obtenues sont du type (fig. 5)

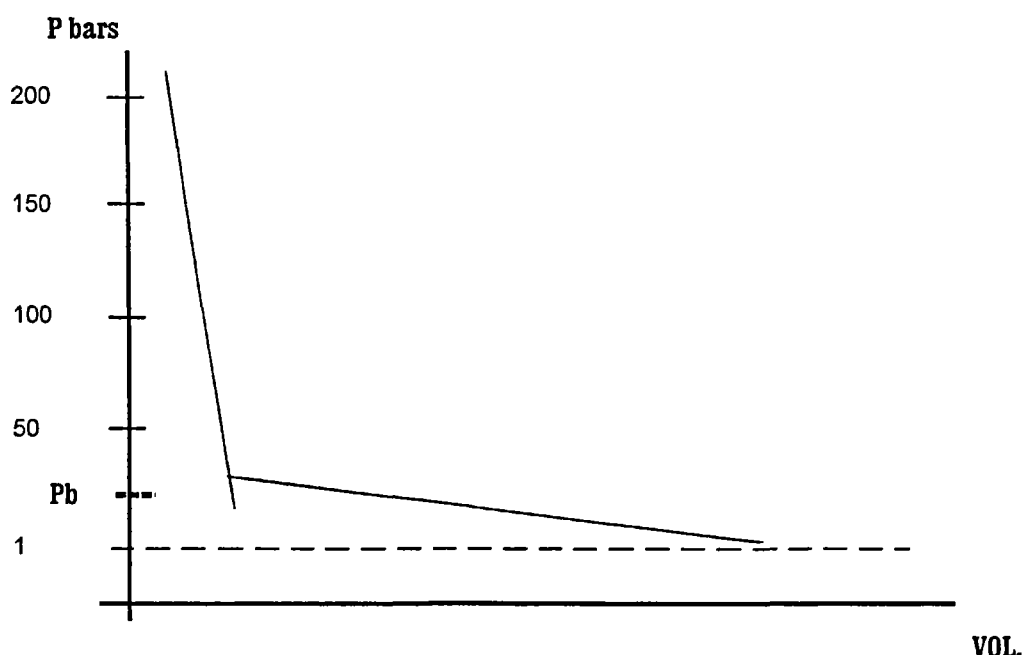


Fig. 5 : Exemple de Courbe P/V

Pb est la pression de point de bulle et le GLR est le rapport

$$\frac{\text{volume de gaz}}{\text{volume de liquide}} \text{ à la pression atmosphérique.}$$

Dans notre cas, la pression de point de bulle est donc la valeur de pression à partir de laquelle les premières bulles de gaz vont s'individualiser dans l'eau, à partir de H₂CO₃.

Des modèles de calcul permettent maintenant de quantifier l'ensemble des phénomènes induits par le dégazage en forage, en ayant au préalable défini les paramètres suivants :

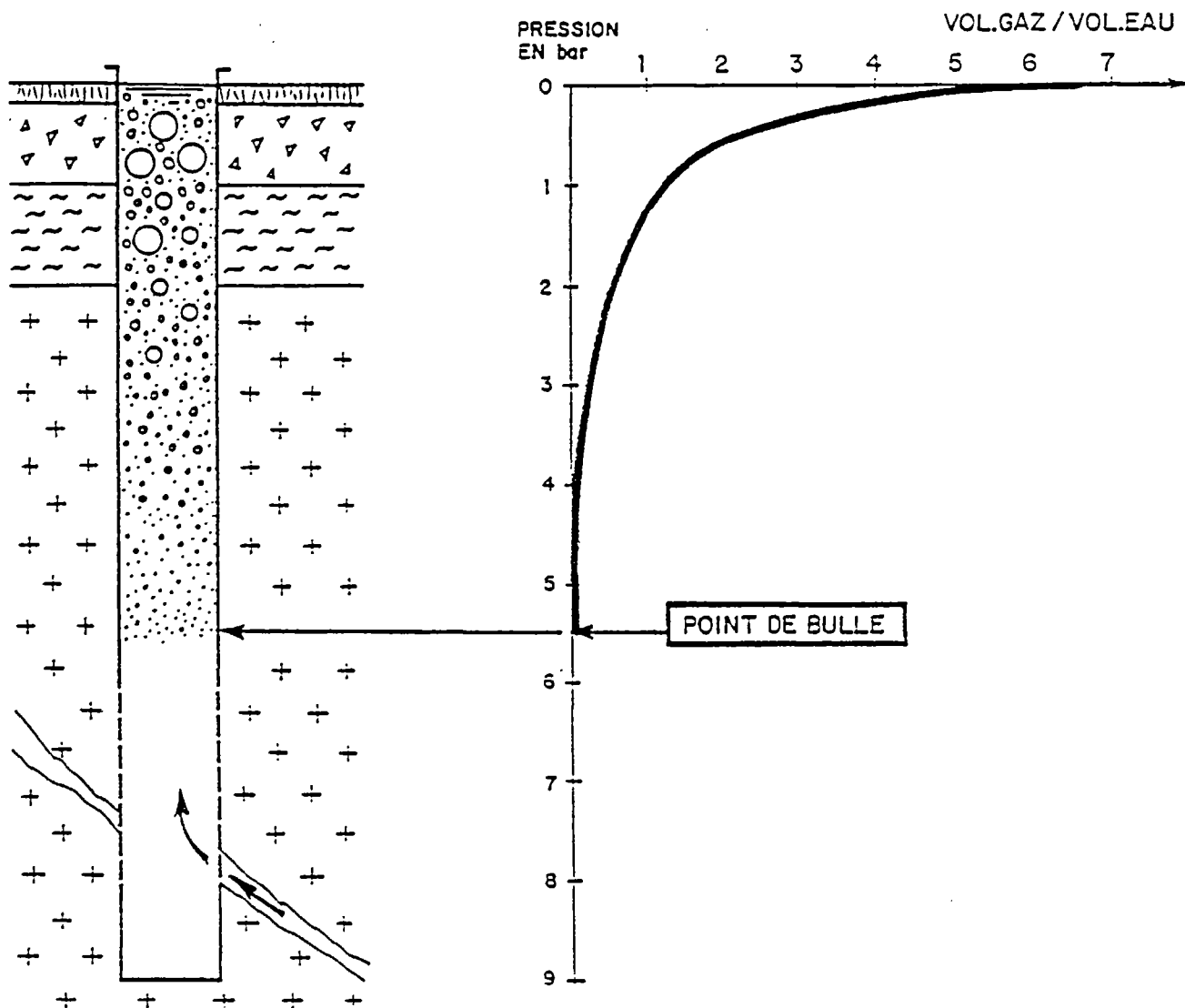
- la composition chimique de l'eau et du gaz à l'émergence
- le débit d'eau et de gaz à l'émergence
- la température de fond de puits et la température à l'émergence.

Exemple de la figure 6

Une telle modélisation réalisée sur une eau minérale gazeuse issue d'un forage de 90 m de profondeur indique une pression de point de bulle de 5,5 bars.

COUPE TECHNIQUE

EVOLUTION DU VOLUME GAZEUX



LEGENDE

- Terre végétale
- Colluvions
- Marnes
- Granite

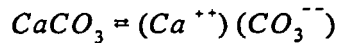
Figure 6 - Evolution du volume gazeux en fonction de la profondeur

En deçà de cette pression, de "début de bulle", le volume gazeux va croître jusqu'à atteindre la valeur le caractérisant à la pression atmosphérique.

Le dégagement de gaz correspondant va bouleverser les équilibres initiaux (de fond) du système carbonate en provoquant des variations significatives du pH de l'eau (fig. 7), entraînant une variation des concentrations de HCO_3^- et CO_3^{--} .

Ces variations vont également entraîner une évolution du comportement de l'eau vis à vis de la calcite.

Pour celle-ci :



L'équilibre s'écrit :



En solution, trois situations théoriques peuvent se présenter :

1) $(\text{Ca}^{++}) (\text{CO}_3^{--}) = Q_s = K_s$

avec Q_s = produit des activités des ions Ca^{++} et CO_3^{--} en solution.

La solution est en équilibre avec la calcite.

2) $Q_s < K_s$, La solution est sous saturée et, en l'absence de CaCO_3 solide, elle est stable. En présence de calcite elle va avoir tendance à en dissoudre jusqu'à ce que $Q_s = K_s$.

3) $Q_s > K_s$, la solution est sursaturée et il doit théoriquement y avoir précipitation mais dans la pratique la vitesse de réaction est faible et en l'absence d'autres facteurs, tels que la présence de particules en suspension ou la rugosité des parois, la solution peut parfois demeurer sursaturée.

Dans l'exemple considéré, le dégazage va entraîner une modification de la distribution des espèces carbonatées et l'état de saturation va suivre une évolution matérialisée par l'évolution de son index de saturation $\log Q_s/K_s$ (fig. 8) : en dessous d'une pression de 3,5 bars, l'eau minérale représentera théoriquement un risque d'entartrage du forage.

Ainsi si ce forage doit être exploité au moyen d'une pompe immergée (et cela vaudrait mieux pour sa préservation) deux conclusions pratiques doivent être tirées :

- la pompe immergée devra être positionnée à une profondeur telle que la pression correspondante soit supérieure à 5,5 bars, de façon à n'aspirer qu'un fluide monophasique. Cette profondeur devra être calculée en fonction du rabattement prévu et des corrections à apporter au gradient de pression, dues à l'effet d'"allègement" lié à la présence de gaz.
- il faudra en principe maintenir une pression de refoulement de 3,5 bars afin d'éviter les problèmes de colmatage et ce jusqu'au point choisi du réseau de surface où la précipitation de CaCO_3 pourra être déclenchée (mise à la pression atmosphérique) et ses inconvénients maîtrisés.

8. MÉTROLOGIE DANS LES FORAGES D'EAUX GAZEUSES

Les développements de l'exemple précédent illustrent également les difficultés qu'il y a à réaliser des mesures correctes dans les forages d'eau gazeuse :

COUPE TECHNIQUE

EVOLUTION DU pH

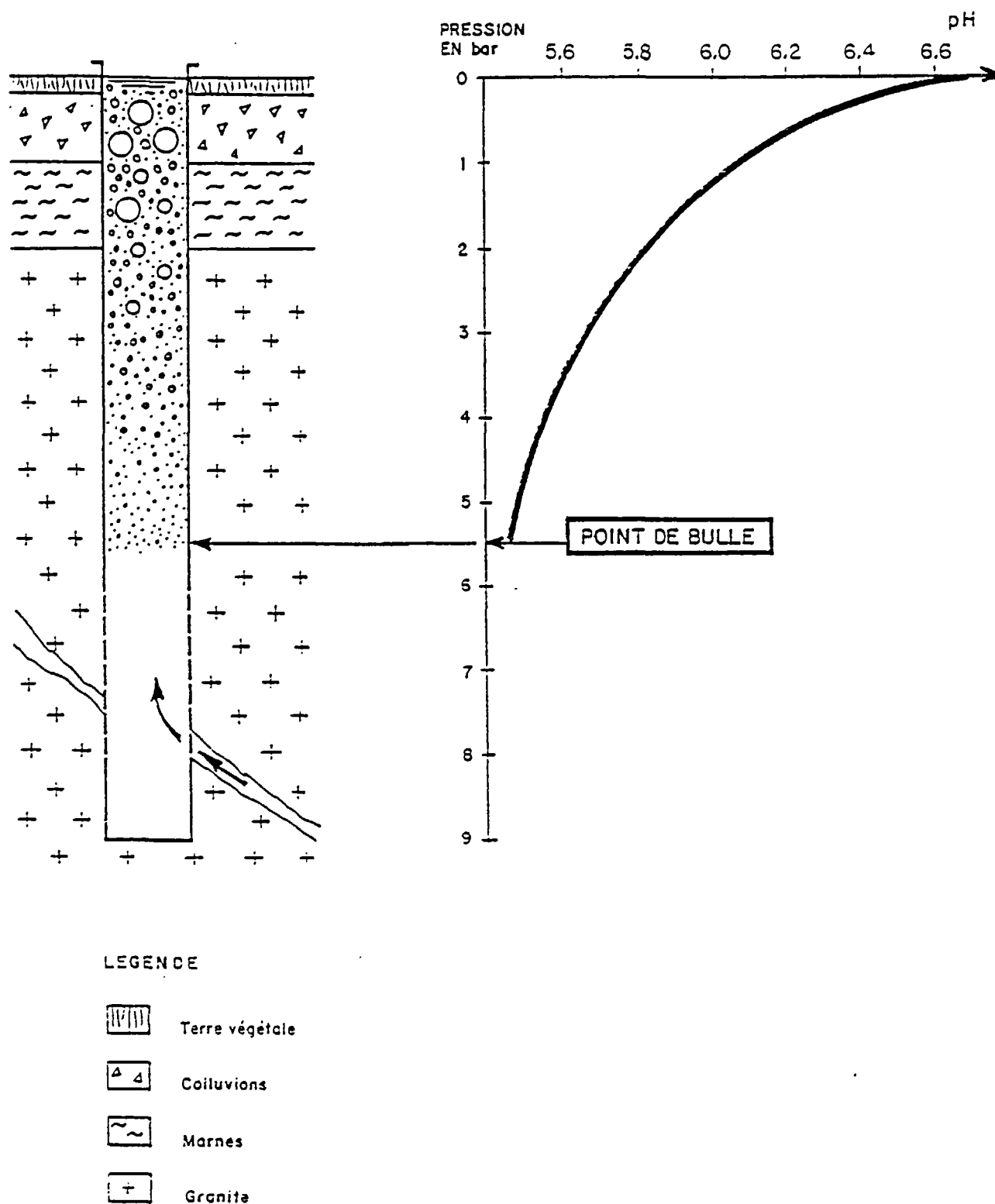
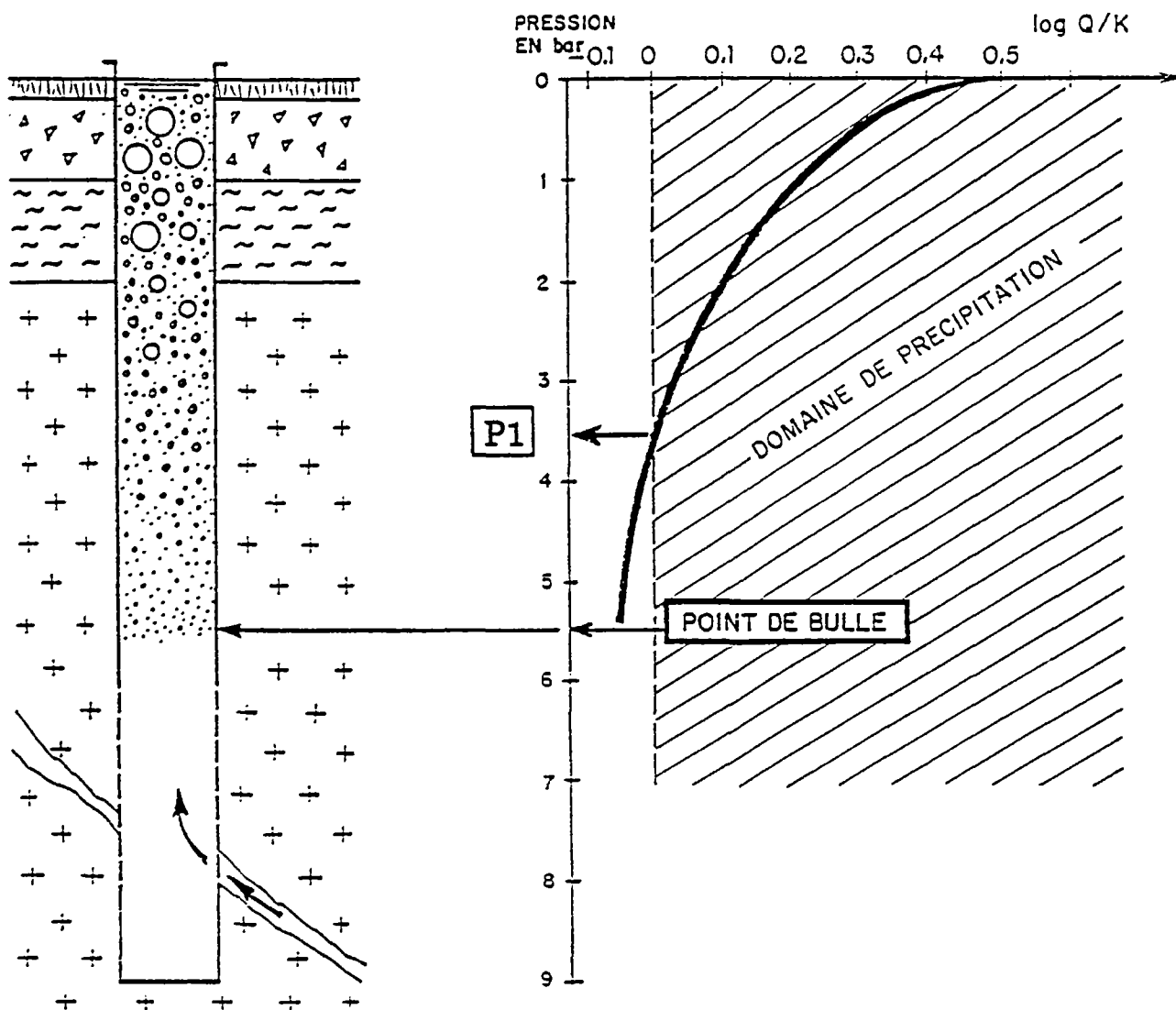


Figure 7 - Evolution du PH en fonction de la profondeur

COUPE TECHNIQUE

EQUILIBRE CHIMIQUE VIS A VIS DES CARBONATES



LEGENDE

- Terre végétale
- Colluvions
- Marnes
- Granite

A partir de P1 l'eau devient entartrante

Figure 8 - Equilibre chimique vis à vis des carbonates

- les mesures classiques, à la sonde de niveau donneront des indications aléatoires et sans aucune signification hydrogéologique : on ne mesurera pas une hauteur d'eau, mais la hauteur d'une émulsion d'eau et de gaz. En fait, dans un forage d'eau gazeuse, la notion de niveau d'eau n'a plus aucun sens et doit être remplacée par des mesures de pression de fond de puits.
- les mesures de conductivité seront fortement perturbées par la circulation des bulles de gaz et par le caractère éventuellement entartrant de l'eau ; elles devront impérativement être réalisées en dessous du niveau de point de bulle.
- la même remarque s'applique aux mesures de débit : elles n'auront aucune signification en milieu diphasique et devront être réalisées sur des portions de canalisation maintenues sous pression supérieure à la pression de point de bulle.

9. LES MESURES DE CO₂ LIBRE À L'ÉMERGENCE

Les résultats d'analyse figurant dans les arrêtés d'autorisation d'exploiter à l'émergence comportent le cas échéant des déterminations du CO₂ libre.

Ces déterminations sont réalisées "in situ", par potentiométrie en présence de carbonate de soude, avec une électrode pH.

Pour limiter la déperdition de CO₂ pendant la mesure, l'échantillon est au préalable refroidi pendant 1 h dans un réfrigérateur.

Pour les contrôles, les laboratoires agréés régionaux peuvent utiliser des méthodes différentes, en particulier la méthode spécifiée par la norme AFNOR 90-011 :

- prélèvement d'un volume connu dans une fiole jaugée contenant un volume connu de NaOH ; le CO₂ libre est transformé en carbonate et on le dose par titration à l'acide jusqu'à décoloration de l'indicateur coloré.

L'important est, que ces laboratoires, interrogés, conviennent qu'il s'agit d'une détermination délicate à effectuer (difficultés de prélever un échantillon représentatif) et que les valeurs fournies sont surtout indicatives ; elles ne peuvent servir de base à l'évaluation de la stabilité de la qualité de l'eau.

A cet égard, une remarque s'impose : toute mesure concernant le système carbonate, réalisée sur une émergence d'eau minérale présentant un dégagement gazeux, peut être considérée comme non représentative car elle est réalisée sur une eau instable en train d'évoluer, au-dessus de son niveau de point de bulle.

La composition réelle de l'eau stable dans le sous-sol ne peut être obtenue que par le calcul.

10. MESURE DU VOLUME DES GAZ DISSOUS

Les eaux fortement gazeuses, à l'émergence à pression atmosphérique perdent brusquement leur excès de gaz libre.

Il peut néanmoins rester pendant assez longtemps des gaz en état de sursaturation.

On mesure parfois le volume correspondant au moyen du Karat (voir annexe) :

- dans un volume d'eau de 100 cc, on libère mécaniquement (par agitation) les gaz encore présents qui vont chasser par pression, un volume équivalent d'eau. Par différence entre le volume initial et le volume final, on obtient le volume de gaz libéré, exprimé en volume %. Le volume de gaz est mesuré à la température de l'eau à l'émergence ; Ces mesures n'ont donc qu'une valeur indicative, "de terrain" permettant simplement de comparer le caractère plus ou moins gazeux de plusieurs émergences voisines.

11. CONCLUSION

La conclusion la plus importante à tirer est que les eaux minérales gazeuses sont particulièrement complexes et fragiles ; elles se présentent dans un état donné, correspondant à certaines conditions hydrogéologiques et physiques, et toutes les données analytiques ou mesures réalisées sur ces eaux doivent être rapportées et évaluées en fonction des conditions dans lesquelles l'échantillon a été prélevé, l'analyse réalisée et la mesure faite.

En l'absence de variation d'autre paramètre tel que la température, on peut résumer les choses ainsi :

- **le dégagement de CO₂** caractérisant ces eaux **va entraîner une variation du pH de l'eau** :
 - . pour des dégagements gazeux faibles, la variation de pH restera faible également et l'eau peut rester stable pour l'ensemble de ses éléments caractéristiques ;
 - . si le dégagement gazeux est important, passé un certain seuil de variation du pH, les équilibres du système carbonate vont se déplacer, affectant de variation les paramètres caractéristiques liés (pH, espèces carbonatées, calcium).

Dans ce cas, seuls les paramètres caractéristiques indépendants du système carbonate pourront être retenus pour témoigner de la constance de la qualité de l'eau considérée.

Par ailleurs, les analyses réalisées sur une eau minérale gazeuse, en surface, ne peuvent être représentatives de ce qu'est cette eau, en réalité dans le proche sous-sol et, a fortiori, dans le gisement : sa composition dans le milieu souterrain ne peut être rapprochée que par le calcul.

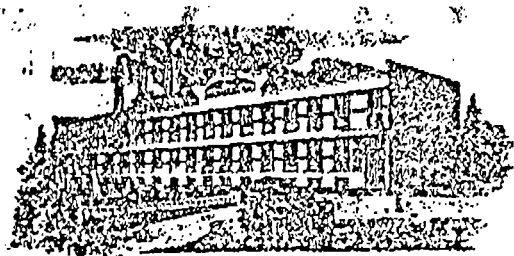
Ce fait, indépendamment des phénomènes de mélanges naturels éventuels, contribue à expliquer les écarts très fréquents de composition chimique entre l'eau minérale gazeuse d'une émergence naturelle, et la même eau recaptée par forage.

Ce constat n'est pas sans poser des problèmes de principe au niveau réglementaire et, dans la pratique, les critères d'appréciation des qualités chimiques de ces eaux, et de leur constance doivent être appliquée avec précautions.

BIBLIOGRAPHIE

- G. MICHARD : ***Equilibres chimiques dans les eaux naturelles***
Collection Sciences et Techniques PUBLISUD 1989
- C.J. ALLEGRE et G. MICHARD : ***Introduction à la géochimie***
P.U.F. 1973
- J. CANNELLAS et B. BLAVOUX : ***Relations entre les structures géologiques, la structure géologique, la composition chimique des eaux minérales et leurs orientations thérapeutiques***
La Houille Blanche 2/3 1995
- B. BLAVOUX et J. DAZY : ***Caractérisation d'une province à CO₂ dans le Sud-Est de la France***
Hydrogéologie n° 4 1990
- F. IUNDT : ***Méthodologie de terrain en hydrogéochimie***
Rapport BRGM 85 SGN 404 Eau 1985

ANNEXE



J. & H. LIEBERG
KASSEL (ALLEMAGNE)
 Adresse télégraphique: PRIMA KASSEL.

Appareil „Karat“

pour la détermination quantitative de l'acide carbonique.

(breveté)

d'après le Dr. P. Haertl, Chef du Laboratoire balnéaire-chimique de Kissingen (Bavière) ancien directeur du Laboratoire de recherches scientifiques, à Nice.

L'appareil est destiné à l'examen d'eaux minérales naturelles à la source même, aux conduites d'eau ou baignoires, ainsi qu'à l'examen des eaux minérales artificielles. Il se prête en outre à la détermination de l'acide carbonique contenue dans la bière, le champagne et autres vins mousseux, les limonades gazeuses, en un mot, pour l'examen de tous les liquides et boissons contenant de l'acide carbonique libre.

Il permet l'obtention de résultats très exacts, dont la régularité pourra facilement être contrôlée en faisant 3 ou 4 expériences consécutives avec le même liquide et en comparant les résultats obtenus.

MODE D'EMPLOI.



Fig. 1

On remplit l'appareil (voir fig. 1) en le plongeant verticalement, la pointe *b* en dessous, dans le liquide que l'on se propose d'examiner, soit dans la source elle-même, soit dans la baignoire, soit dans tout autre récipient à l'aide duquel on aura puisé l'eau avec précaution.

L'appareil étant rempli jusqu'au dessus du point *O*, on l'en retire, en prenant soin de le tenir toujours dans la position verticale.

Le surplus de liquide qui se trouve en ce moment au delà de *O* s'écoule naturellement de suite par le tube d'échappement, après quoi le niveau se trouve exactement à hauteur du point *O*, l'appareil contenant ainsi exactement 100 cc d'eau minérale à température de source.

On ferme alors l'appareil à l'aide du bouchon en caoutchouc, et de telle façon que le dessous du bouchon corresponde exactement avec la marque 125 cc qui se trouve au goulot de l'appareil. On attend quelques instants afin que la

pression d'air produite par l'introduction du bouchon se soit annihilée, après quoi l'opération proprement dite peut commencer:

Dans ce but, on tient l'appareil des deux mains, en posant l'index de la main droite sur le bouchon, le pouce et le médus tenant le goulot; de l'index de la main gauche, on bouche l'orifice *b*, tandis que le pouce et le médus gauches tiennent le dessous de l'appareil.

On retourne alors l'appareil, sans que les doigts quittent leurs positions respectives, la pointe *b* dirigée

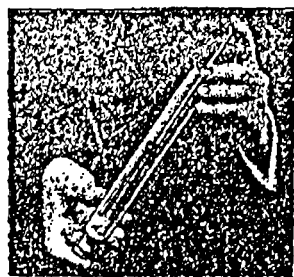


Fig. 2

un peu obliquement vers le haut (voir fig. 2) et l'on secoue fortement dans cette direction. On remarquera que par suite de cette manipulation, l'eau s'est engagée dans le goulot de l'appareil. On soulève alors légèrement l'index de la main gauche

de la pointe *b*, de laquelle se dégagera alors, sous l'influence de la pression exercée par le gaz dégagé,

une certaine quantité de liquide sous forme de jet. Ce dégagement de liquide ayant cessé, on referme l'orifice *b* à l'aide du doigt et l'on recommence la même manipulation jusqu'à ce que l'éjection d'eau ait pris fin, ce qui arrive ordinairement après la 3^{me} ou 5^{me} reprise. Après cela, on referme encore une fois l'orifice *b* à l'aide du doigt et l'on reporte l'appareil

dans sa position première, bien verticale, la pointe *b* dirigée vers le sol. Après que la colonne de liquide sera descendue dans l'appareil, on dégage l'orifice *b* et on lit alors sur l'échelle, divisée en centimètres cubes, le volume du gaz dégagé en même temps que la température indiquée à ce moment par le thermomètre.

Ces données permettent d'établir exactement, à l'aide de la table¹⁾ le pourcent d'acide carbonique libre contenu dans le liquide examiné. Pour les températures et volumes qui ne se trouvent pas indiqués sur la table, il suffira d'interpoler pour obtenir le résultat exact.

Quantité d'acide carbonique libre

en cc, contenue dans 1 litre d'eau à température de la source:

Volume du gaz dégagé cc	Température								
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
5	320	280	250	220	200	180	170	160	150
10	530	490	460	430	400	380	310	290	280
15	750	680	640	610	590	560	530	500	480
20	910	810	770	740	710	680	650	620	600
25	1050	930	890	860	830	800	770	740	710
30	1170	1040	1000	970	940	910	880	850	820
35	1280	1140	1100	1070	1040	1010	980	950	920
40	1380	1240	1200	1170	1140	1110	1080	1050	1020
45	1480	1330	1290	1260	1230	1200	1170	1140	1110
50	1570	1410	1370	1340	1310	1280	1250	1220	1190
55	1670	1490	1450	1420	1390	1360	1330	1300	1270
60	1730	1550	1510	1480	1450	1420	1390	1360	1330
65	1800	1610	1570	1540	1510	1480	1450	1420	1390
70	1880	1700	1660	1630	1600	1570	1540	1510	1480
75	1950	1770	1730	1700	1670	1640	1610	1580	1550

Prix de l'appareil „Karat“, complet avec thermomètre et bouchon caoutchouc, en étui bois très élégant Frs. 18.75 la pièce.

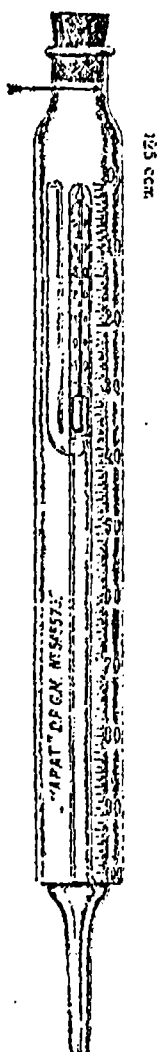


Fig. 4
env. 1/2 grand.
naturelle

La manipulation de l'appareil ainsi que son usage, est aussi simple que facile; le résultat désiré s'obtient si aisément et exactement, que tout novice est à même de s'en servir sur-le-champ et de contrôler l'eau de la baignoire au point de vue gazeux. Le baigneur pourra donc s'assurer à tout moment, et personnellement, de la richesse en gaz de l'eau dans laquelle il se baigne.

Il est évident que ceci constitue un avantage réel, autant pour le baigneur, le médecin et le propriétaire des bains.

L'appareil présente tout autant d'avantages pour le contrôle de tous les autres liquides contenant de l'acide carbonique.

¹⁾ Voir R. Fresenius et L. Grünhut, Zeitschrift für analytische Chemie 53, 285 1914.



Abandon et fermeture des forages

Note technique n° 11

Novembre 1997

R É S U M É

Méthode directe d'acquisition de données sur un gisement, le forage d'eau minérale entre en contact avec une ressource qui se doit d'être stable dans le temps. Or la réalisation d'un forage peut induire la mise en communication de l'aquifère d'eau minérale avec d'autres horizons de qualité distincte. Ces relations peuvent modifier la qualité de l'eau minérale et créer des désordres. Ainsi, si dans le cadre des forages d'exploitation toutes les précautions sont généralement prises pour préserver la qualité du fluide recherché, il doit impérativement en être de même pour les forages non équipés, qu'ils soient abandonnés ou voués à d'autres usages.

L'abandon et la fermeture des forages constituent donc un aspect à part entière dans la protection de l'environnement et en particulier dans la protection des ressources d'eau minérale. Les techniques impliquées pour ces actions nécessitent une analyse détaillée du contexte hydrogéologique et des conditions de réalisation d'un ouvrage pour répondre à chaque cas particulier.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. RAPPELS THÉORIQUES SUR LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES ...	1
3. ASPECT RÉGLEMENTAIRE - RESPONSABILITÉ	2
4. ETUDES PRÉALABLES A LA PROCÉDURE D'ABANDON	2
5. FERMETURE DÉFINITIVE (Abandon de forage)	3
5.1 Conditions générales de réalisation	3
5.2 Isolement des niveaux-réservoirs dans le découvert (figure 2)	4
5.3 Isolation du découvert	4
5.4 Isolement des annulaires non cimentés (cf figure 4 schéma a)	4
5.5 Bouchon sur tête de tubage ou coupe de tubage (cf figure 4 schéma b)	5
5.6 Isolement complémentaire des annulaires cimentés (cf figure 4 schéma c)	5
5.7 Bouchage en surface (cf figure 5 schéma a)	5
5.8 Récupération des équipements en tête d'ouvrage	5
6. FERMETURE PARTIELLE OU TEMPORAIRE	5
7. CONCLUSION	6
BIBLIOGRAPHIE	7

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Mode de circulation entre aquifères dans un forage (rappel théorique)

Figure 2 : Isolement de niveaux-réservoirs dans le découvert

Figure 3 : Isolement du découvert

Figure 4 : Isolement des annulaires et des têtes ou des coupes de tubage

Figure 5 : Bouchage en surface et tête de piézomètre

1. INTRODUCTION

Les émergences d'eaux minérales, qu'elles soient naturelles ou forées, sont des points qui correspondent à des lieux de circulation préférentielle, c'est-à-dire permettant une exploitation à un débit donné d'un fluide de qualité donnée et stable dans le temps.

La réalisation de forages dans un gisement d'eau minérale, que les travaux soient réalisés pour améliorer la connaissance du site (reconnaissance) ou les conditions de captage, permet en général une mise en communication de l'aquifère cible (contenant l'eau minérale recherchée) avec d'autres horizons (aquifères profonds ou de surface).

Lorsqu'il s'agit d'ouvrage de captage de la ressource minérale, les conditions d'équipement du forage sont conçues pour assurer la maîtrise des relations entre aquifères.

Dès lors que le forage est abandonné, il constitue un point fragile du système qui, s'il n'est pas convenablement traité, peut être à l'origine de pollutions ou modifications plus ou moins graves d'une ressource d'eau minérale.

Au fil du temps, la structure d'un ouvrage abandonné va se détruire par corrosion et mettre en communication toutes les formations géologiques au droit du forage. On risque par conséquent de mélanger des niveaux aquifères de mauvaise qualité avec des niveaux plus intéressants. Cela peut aboutir à la destruction partielle ou totale de l'aquifère. A cette interférence entre niveaux géologiques, s'ajoute l'introduction dans l'ouvrage abandonné des eaux de surface comme des eaux de pluie, ou plus grave encore, des eaux polluées.

L'abandon d'un ouvrage est donc un problème sérieux qu'il faut traiter avec soin. Sur le principe, il s'agit d'une opération qui entre dans le cadre très large de la politique de l'environnement (conservation des ressources).

L'objet de la présente note technique est de synthétiser les prescriptions et recommandations techniques considérées comme les règles de l'art, admises dans le cadre de l'instruction de l'abandon ou du délaissement d'ouvrages.

Le principe de la fermeture est la restauration de l'isolation des différents niveaux-réservoirs. Une attention particulière devra être apportée aux niveaux à protéger en raison de leur exploitation actuelle ou future.

2. RAPPELS THÉORIQUES SUR LA CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

Il est admis dans le langage courant que l'eau coule de haut en bas (elle descend). Cela traduit un écoulement en surface selon les lois de la gravité. Dans le sous-sol, le fluide obéit à un déplacement lié à des pressions, il y a transfert depuis les pressions les plus élevées vers les pressions les plus faibles. Ainsi pour 2 aquifères superposés, séparés par un niveau imperméable, le flux de transfert entre les 2 niveaux aquifères dépend de la pression relative de chacun d'eux comme l'illustre la figure 1.

Schéma a : flux descendant

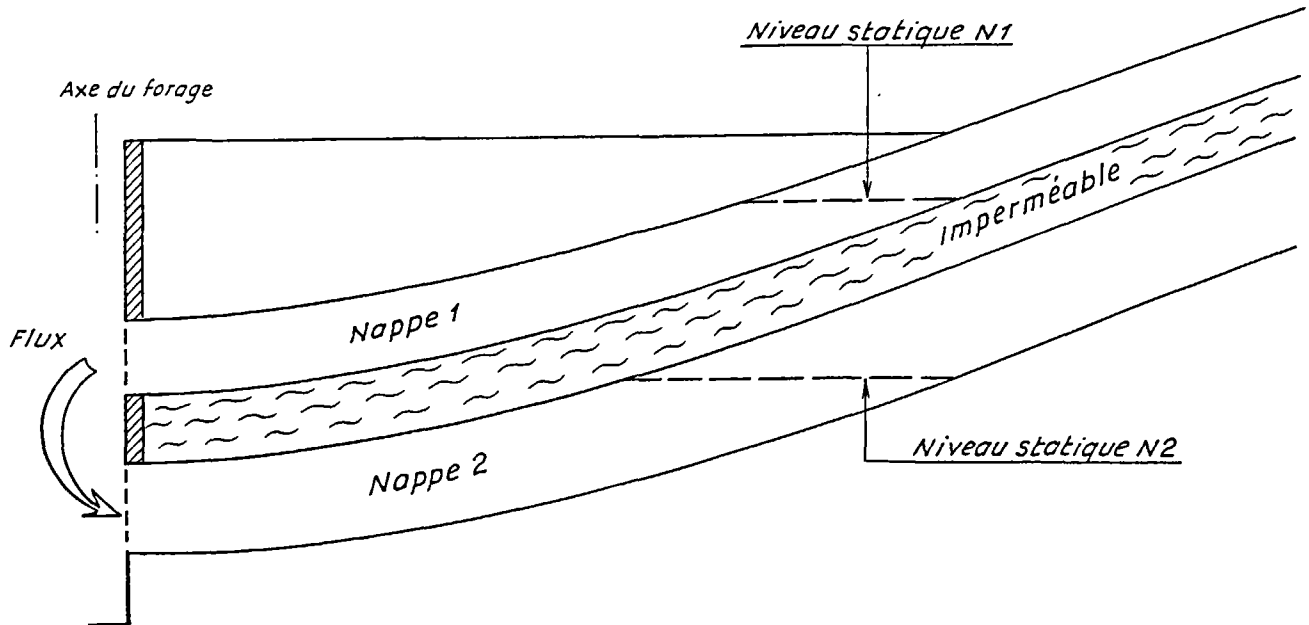
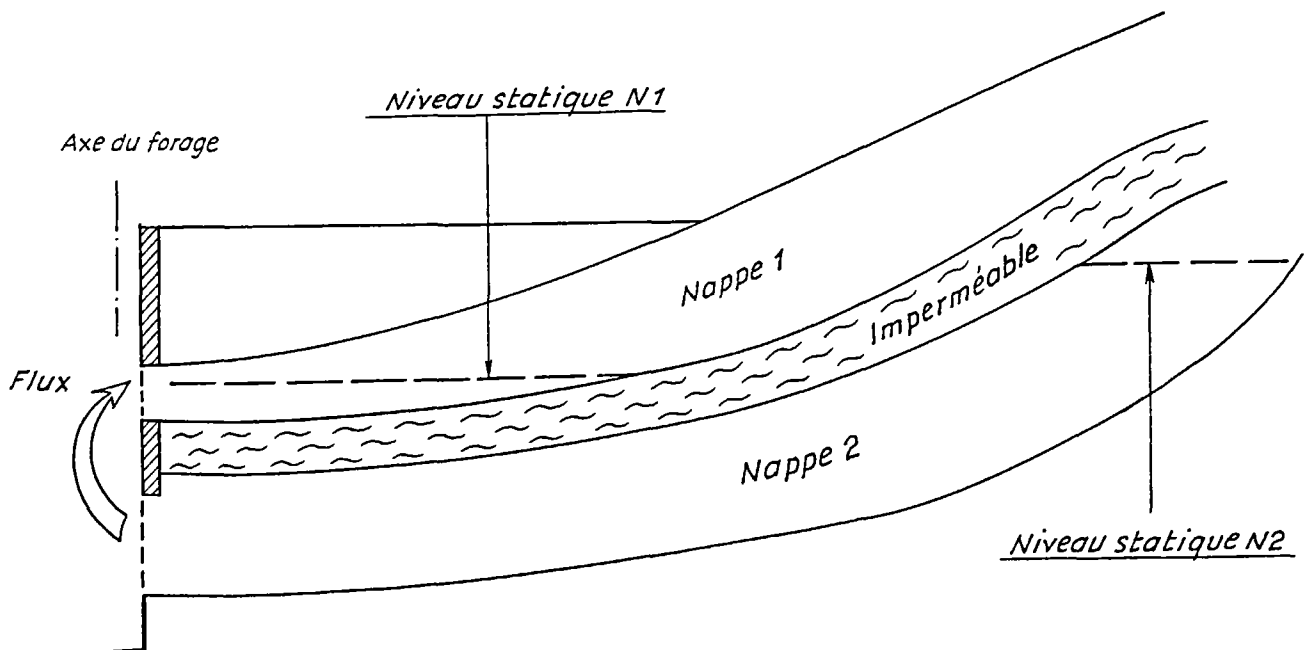


Schéma b : flux ascendant



 Tubage cimenté

 Crépine

 Tubage plein
(décanteur)

Figure 1 - Mode de circulation entre aquifères dans un forage (rappel théorique)

Supposons dans l'exemple proposé que la nappe 1 soit de qualité différente de la nappe 2 et que cette dernière représente notre réserve d'eau minérale. Dans le schéma a, le risque de contamination de la réserve d'eau minérale est fort (flux descendant de 1 vers 2). Dans le schéma b, le risque paraît moins évident, les écoulements ayant lieu de 2 vers 1.

Ce rappel théorique a pour objet de montrer que si la relation entre différents niveaux aquifères est à contrôler de manière stricte, le risque encouru en un site donné, en égard à la protection d'une ressource, est étroitement lié au contexte hydrogéologique.

On retiendra que, quel que soit le risque hydrogéologique, il convient d'exiger de reconstituer l'étanchéité entre nappes superposées dans les cas où une des nappes concernées est polluée bactériologiquement.

3. ASPECT RÉGLEMENTAIRE - RESPONSABILITÉ

Si le problème de communication entre les nappes aquifères n'est pas explicitement traité dans les textes réglementaires, la loi sur l'eau constitue le guide en la matière compte-tenu du fait que ses dispositions ont pour objet (article 2) *“une gestion équilibrée de la ressource en eau visant à assurer la protection contre toute pollution et la restauration de la qualité des eaux souterraines de manière à satisfaire les exigences de la conservation et du libre écoulement des eaux”*.

Ainsi toutes les précautions doivent être prises pour assurer un maintien de la qualité d'un aquifère. On notera que certains travaux, dont les forages sous certaines conditions, entrent dans la nomenclature des opérations soumises à déclaration ou à autorisation (point 1.1.0 - 4.3.0 - 6.1.0) et nécessitent une procédure réglementaire par laquelle peut être demandée l'analyse de l'impact (ou des risques) inhérent à un projet.

Pour ce qui concerne la responsabilité quant à l'abandon de forages, il est clair que le maître d'ouvrage est responsable d'une part de la prise de décision conduisant à l'abandon définitif ou provisoire d'un puits et d'autre part du respect des dispositions légales en la matière.

Le maître d'oeuvre est responsable de la réalisation technique de l'abandon conformément aux directives du maître d'ouvrage et aux règles techniques. Il lui incombe notamment :

- de rédiger le rapport d'intervention de l'abandon,
- de faire ou faire réaliser l'inspection périodique des sites provisoirement délaissés conformément à la demande du maître d'ouvrage et dans le respect des contraintes administratives ou légales.

4. ETUDES PRÉALABLES A LA PROCÉDURE D'ABANDON

Dans le but d'améliorer les conditions de sécurité concernant la protection des niveaux aquifères en préalable aux travaux d'abandon proprement dits, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de l'ouvrage. A cet effet, les opérations suivantes peuvent être préconisées :

- Analyse et synthèse des documents sur lesquels sont consignés les événements survenus lors de la foration initiale (notamment zones à pertes, à venues, stabilité des formations, etc...).

L'analyse des diagraphies complète également la connaissance des terrains traversés. Les problèmes éventuels rencontrés en cours d'exploitation doivent également être analysés.

- Diagnostic de l'ouvrage avant de lancer la procédure d'abandon. Cette phase permet de vérifier l'état du puits afin d'établir concrètement le programme d'abandon. Suivant le cas et la complexité de l'ouvrage à traiter, on peut être amené à procéder aux opérations suivantes :
 - Contrôle du fond de puits afin de vérifier la présence ou non d'éboulement en fond de puits ;
 - Calibrage des tubages par outil de diagraphie (mécanique, ultrasonique ...) afin de connaître les zones de corrosion éventuelles (et/ou dépôts). Dans certains cas, un contrôle par vidéo caméra peut être également effectué ;
 - Vérification de la qualité de la cimentation annulaire des tubages par diagraphie ;
 - Avoir connaissance de la qualité chimique du fluide en place et des écoulements afin de choisir une qualité de ciment compatible avec lui et d'autre part pouvoir, le cas échéant, lui adjoindre un inhibiteur de corrosion.
 - Un test simple, de mise en pression du tubage permet d'en vérifier l'intégrité.
- Pour les forages de faible diamètre et faible profondeur, la cimentation sur toute la hauteur sera de règle compte tenu des faibles quantités en jeu (diamètre 150 mm, profondeur 100 m $\Rightarrow$ environ 1,8 m³ de ciment).

5. FERMETURE DÉFINITIVE (Abandon de forage)

5.1 Conditions générales de réalisation

Les opérations de fermeture ne doivent pas rompre l'équilibre hydrostatique du sondage. Le fluide (boue, saumure inhibée, etc...) qui sera laissé entre les bouchons doit avoir une densité telle que le volume injecté équilibre la plus forte pression rencontrée pendant la foration de la phase considérée.

Les bouchons peuvent être mécaniques ou hydrauliques (ciment).

Le laitier de ciment généralement utilisé pour les bouchons hydrauliques pourra être remplacé par un autre liant (résine acrylique par exemple). Par simplification, le terme générique "ciment" est utilisé dans les développements qui suivent.

Quelques principes à respecter :

- Lorsque le forage est muni d'une bride pleine sur le sommet du tube de surface, celle-ci devra comporter un taraudage 1/2" avec vanne et manomètre afin de pouvoir connaître la pression amont à tout moment lors de l'opération d'obturation.
- Dans certains cas particuliers, les risques relatifs à la corrosion par les fluides en place ou par l'électrolyse due aux courants vagabonds peut réclamer des traitements anti-corrosion (inhibition) ou des procédures particulières d'abandon.
- La mise en place d'un bouchon de ciment devra se faire par injection en pression du laitier au niveau souhaité (une cimentation gravitaire ne présente pas en général de garantie de mise en place adéquate).
- Le niveau atteint par le ciment dans les divers annulaires doit être connu avant d'établir le programme d'abandon.
- Les bouchons de ciment auront un volume minimum de 1 m³.

Nota : Dans la suite du document sont utilisés les termes découvert et annulaire. Le découvert correspond à la zone forée sans tubage, L'annulaire correspond à la zone située entre un tubage et le terrain.

5.2 Isolement des niveaux-réservoirs dans le découvert [figure 2]

De bas en haut, chaque niveau producteur sera isolé du niveau producteur suivant par un bouchon de ciment placé entre ces deux niveaux.

Un ensemble multicouches constitué de niveaux-réservoir minces, pris entre des niveaux argileux peu épais, sera traité comme un niveau réservoir unique. Toutefois, si ces couches sont susceptibles de contenir des fluides de nature différente et/ou à des régimes de pression différents, le bouchon de ciment devra également couvrir cet ensemble.

Ces bouchons seront mis en place par circulation (c'est-à-dire avec une pompe d'injection et non de façon gravitaire).

5.3 Isolation du découvert

Un bouchon de ciment sera posé à cheval sur le sabot (base) du dernier cuvelage. Il sera mis en place par circulation (figure 3 schéma a)

En cas de perte de circulation lors de la mise en place d'un bouchon de ciment, on pourra se contenter d'un bouchon mécanique plein (Bridge plug) surmonté d'un bouchon de ciment (figure 3 schéma b).

Dans certain cas, lorsque la complétion⁽¹⁾ est laissée dans le forage, la crépine pourra être remplie par du gravier, surmonté par un bouchon de ciment (figure 3 schéma c).

5.4 Isolement des annulaires non cimentés [cf figure 4 schéma a]

S'il existe des annulaires (espace terrain-tubage) non remplis de ciment et comportant des niveaux susceptibles d'être des réservoirs, et si ces niveaux communiquent entre eux ou communiquent avec la surface, il faudra les isoler :

(1) Complétion : Colonne de captage équipant le forage (par exemple : crépine + massif filtrant).

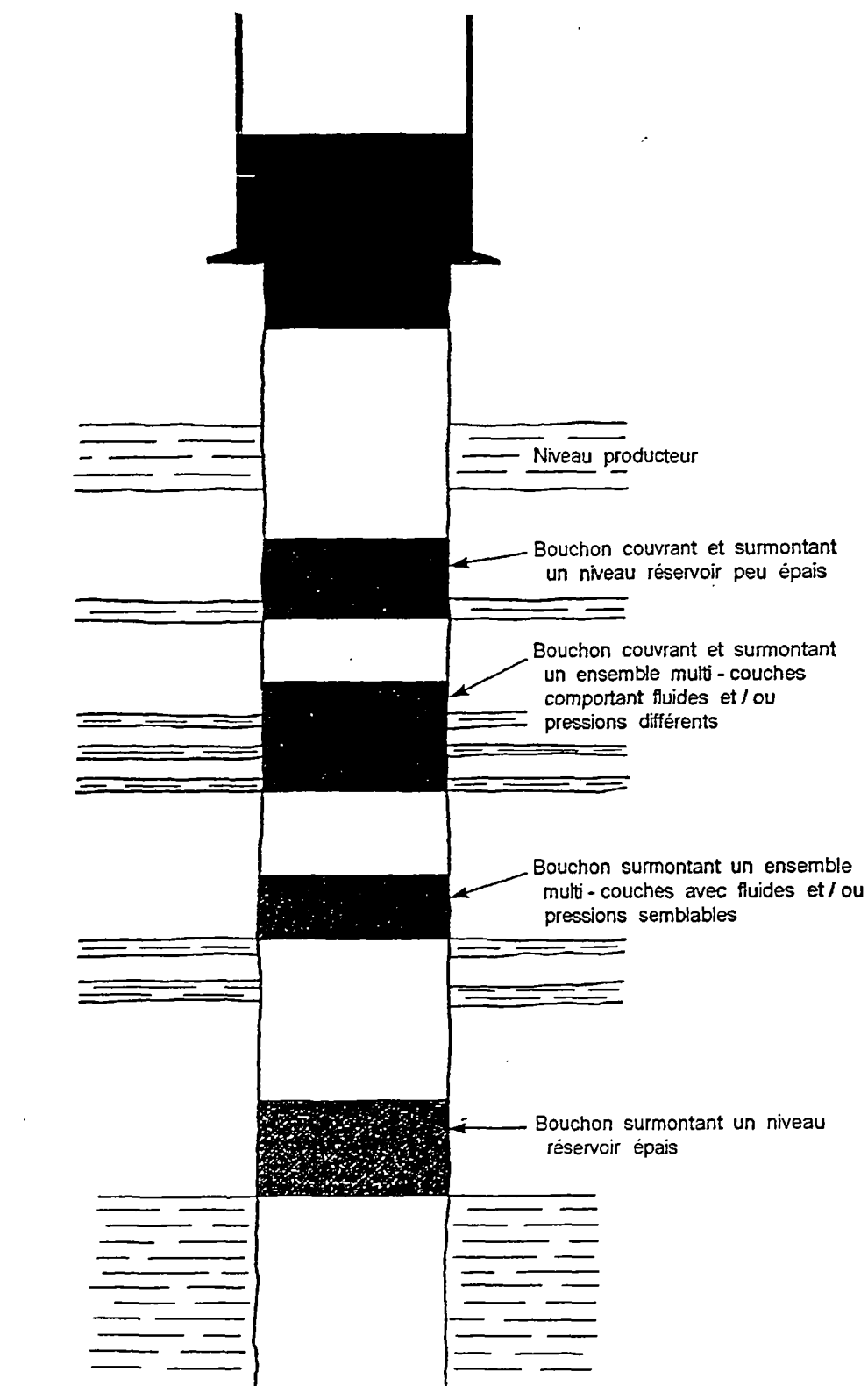
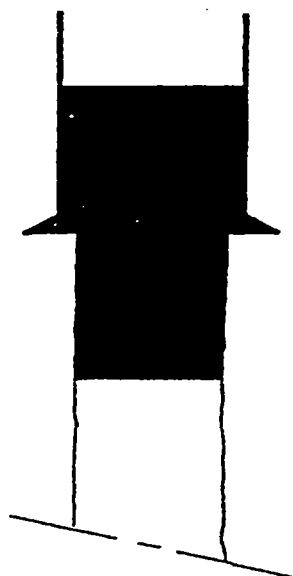


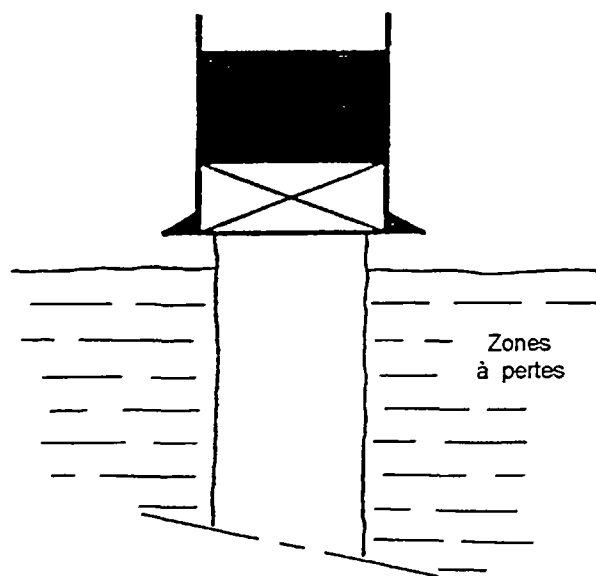
Figure 2 - Isolement de niveaux-réservoirs dans le découvert

Schéma a



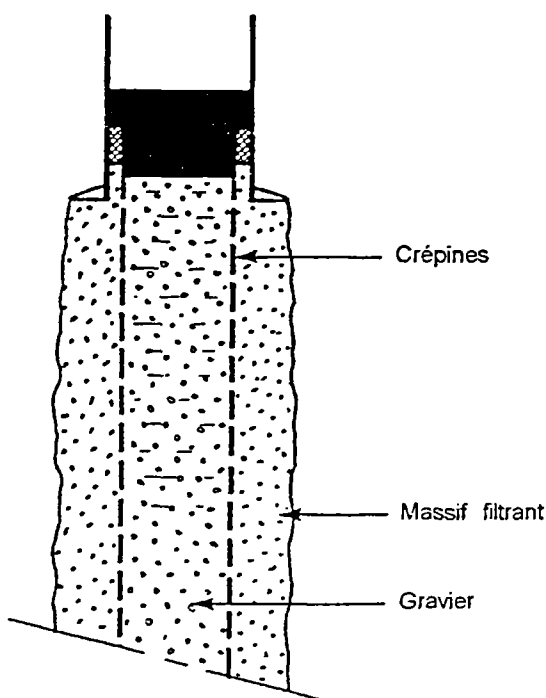
Bouchon posé à cheval
sur le sabot
du dernier tubage

Schéma b



Bouchon mécanique
surmonté d'un bouchon
de ciment

Schéma c



Bouchon posé à cheval sur tête
de la colonne de captage
avec les crépines remplies par du gravier

Figure 3 - Isolement du découvert

- soit par injection sous pression (squeeze) ou circulation de ciment par des perforations,
- soit par injection sous pression (squeeze) de ciment par l'espace annulaire à partir de la tête de puits.

Si le tubage a été coupé et retiré, l'isolement se fera par mise en place de bouchons comme pour le découvert (point 2 ci-dessus).

5.5 Bouchon sur tête de tubage ou coupe de tubage [cf figure 4 schéma b]

Un bouchon sera mis en place par circulation à cheval sur chaque coupe du tubage ou sur la tête du tubage. Les coupes de tubage pourront également être isolées par un bouchon mécanique plein ancré dans le tubage supérieur à moins de 20 mètres de la coupe et surmonté par un bouchon de ciment.

5.6 Isolement complémentaire des annulaires cimentés [cf figure 4 schéma c]

Si la qualité de la gaine de ciment annulaire terrain-tubage est douteuse et s'il y a risque de percement du tubage par corrosion, des bouchons seront placés à l'intérieur du tubage pour interdire tout risque de communication entre deux niveaux-réservoirs, de pression et/ou de fluides différents, situés au droit de la partie cimentée de ce tubage.

5.7 Bouchage en surface [cf figure 5 schéma a]

Un bouchon sera mis en place par circulation, le haut du bouchon sera situé à moins de 10 m sous le niveau du sol (généralement au niveau du sol).

5.8 Récupération des équipements en tête d'ouvrage

La récupération des tubages libres et de la tête de puits pourra être effectuée après que soit vérifiée l'absence de pression (sécurité pour contenir toute éruption) dans les annulaires (ouverture ou perforation, remplissage, observation). Elle sera programmée de façon que soit satisfaits les impératifs d'isolation et de bouchage prévus dans les paragraphes 5.1 à 5.7 et remplies les conditions de test décrites au chapitre 4.

6. FERMETURE PARTIELLE OU TEMPORAIRE

Deux cas peuvent être distingués.

6.1 Fermeture partielle lorsque l'horizon à exploiter est situé au dessus du fond de puits.

L'isolement des niveaux situés au-dessous du niveau qu'il est prévu d'exploiter sera le même que dans le cas d'un bouchage définitif paragraphes 5.1 à 5.7 ci-avant.

6.2 Fermeture temporaire lorsque l'exploitant envisage de revenir sur le puits pour en reprendre son exploitation, l'approfondir ou pour exploiter un autre niveau-réservoir

Les opérations de fermeture temporaire seront effectuées selon les paragraphes 5.4 à 5.7 ci-dessus, l'isolation de la partie réservoir permettra une remise en exploitation si nécessaire.

ISOLEMENT DES ANNULAIRES NON CIMENTES

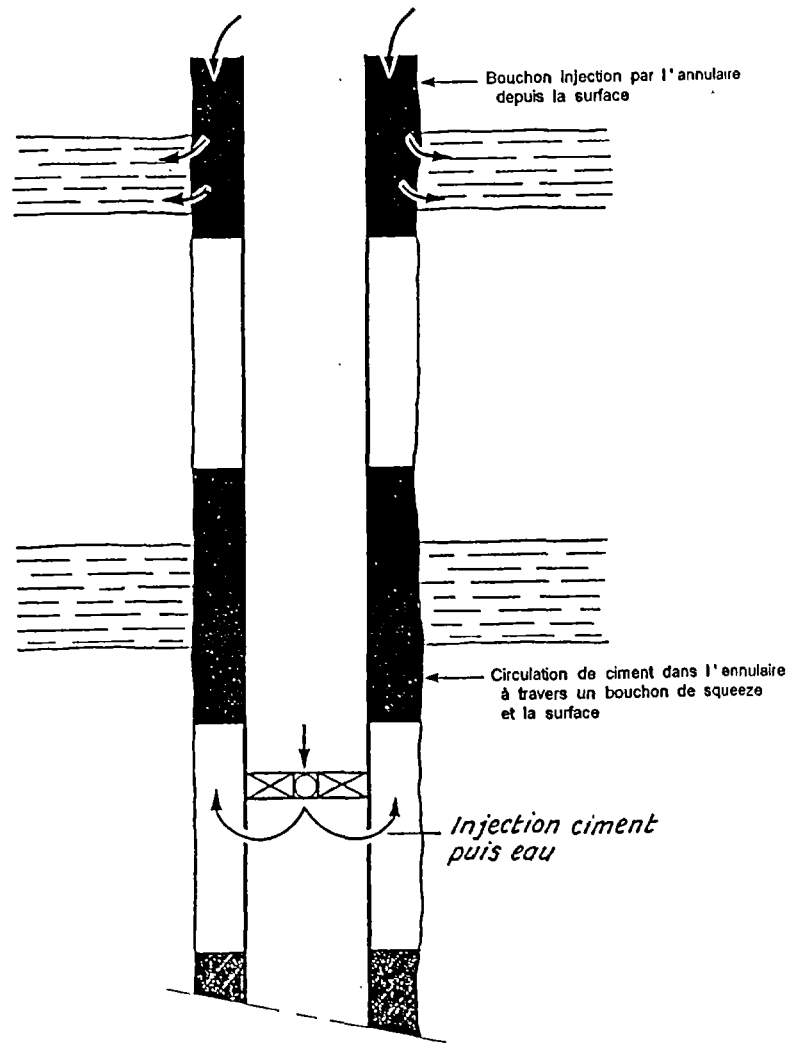


Schéma a

BOUCHON SUR TÊTE DE LINE
OU
COUPE DE TUBAGE

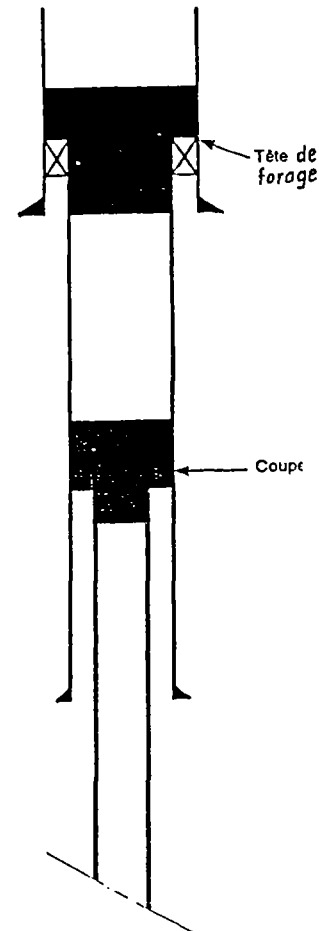


Schéma b

ISOLEMENT COMPLEMENTAIRE
DES ANNULAIRES CIMENTES

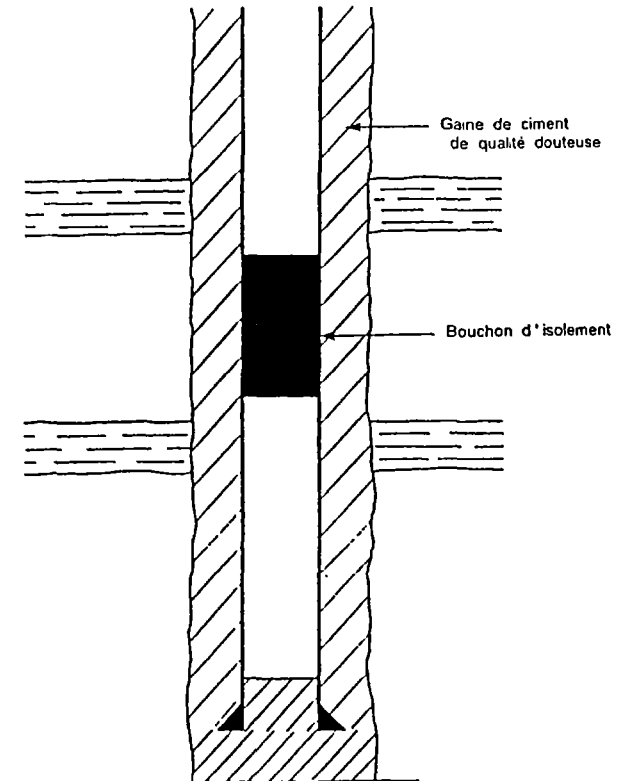


Schéma c

Figure 4 - Isolement des annulaires et des têtes ou des coupes de tubage

BOUCHAGE EN SURFACE

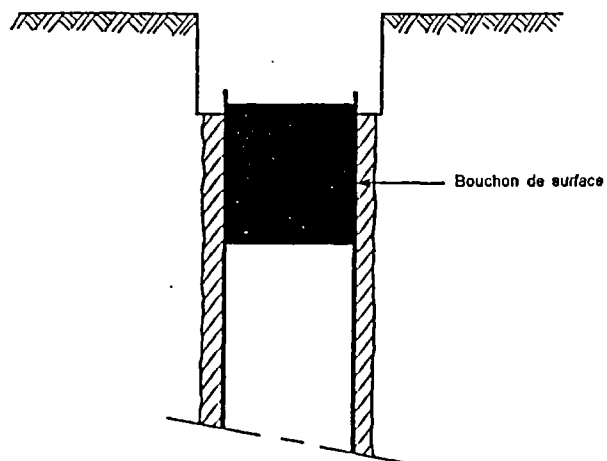


Schéma a

FERMETURE DE PIEZOMETRE

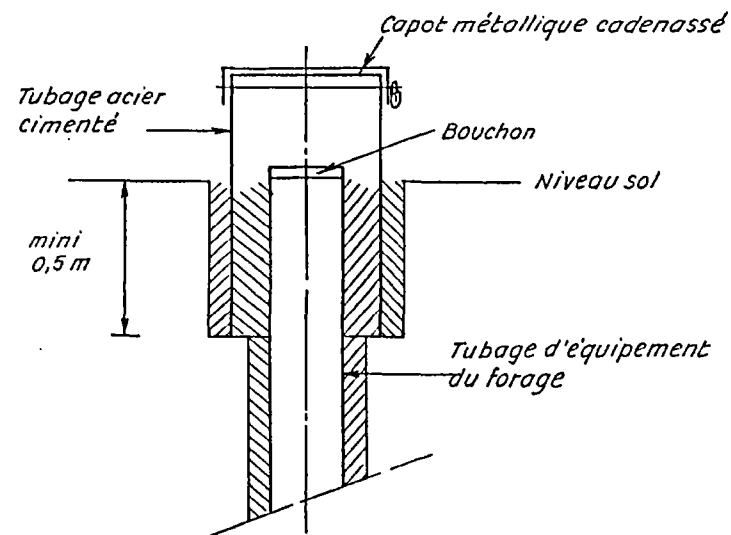


Schéma b

Figure 5 - Bouchage en surface et tête de piézomètre

Afin de garantir l'intégrité du réservoir, un bouchon mécanique (Bridge plug) sera ancré au sabot du dernier tubage et sera surmonté par un bouchon de ciment (fig. 3 - schéma b).

Nota : *Un ouvrage qui n'est pas abandonné totalement peut être utilisé en piézomètre pour certains besoins spécifiques (niveau piézométrique, point prélèvement qualité ...). Dans tous les cas, il est utile que l'aménagement de tête de puits permette d'assurer la sécurité du point. Pour ce faire, il est conseillé de mettre en place un tubage acier cimenté, coiffant le tubage d'équipement du forage, et cadénassé. Ce tubage acier de protection dépassera du sol ou pourra se situer sous une plaque type égout. La figure 5 schéma b permet de visualiser une fermeture de piézomètre.*

7. CONCLUSION

Les forages constituent des points d'observation très intéressants donc très utilisés pour l'étude des gisements. Ces mêmes points peuvent aussi, si leur conception ne suit pas les règles de l'art, induire des nuisances importantes pour l'environnement. La mise en communication d'un niveau aquifère d'eau minérale avec d'autres niveaux aquifères (supérieurs ou inférieurs, profonds ou de surface), par l'intermédiaire d'un forage, peut modifier les caractéristiques de l'eau concernée dont on sait qu'elles doivent rester constantes dans le temps (cf définition d'une eau minérale).

C'est pourquoi, il est indispensable que les forages réalisés, tout particulièrement ceux concernant un gisement d'eau minérale, bénéficient d'une attention renforcée non seulement pendant mais également après leur réalisation, que ce soit dans le cadre d'une procédure d'abandon ou dans le cadre d'une procédure de fermeture pour usage spécifique.

Les conditions d'abandon des forages nécessitent une analyse détaillée des contextes hydrogéologique et technique de réalisation des ouvrages afin de mettre en oeuvre la technique d'obturation la plus adaptée dans un souci de conservation de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- **Abandon et fermeture des forages - Prescriptions et recommandations techniques - Rapport ANTEA - NT007/EAU/94 - 09/94 E. BERTET (document interne)**
- **Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement - Rapport 38261 - BRGM - 09/95 (document public)**



Mesures et suivi d'exploitation des émergences d'eau minérale

Note technique n° 12

Février 1998

R É S U M É

Les techniques de suivi des caractéristiques des eaux minérales ont énormément évolué, en parallèle avec les techniques de captage et les progrès de l'électronique.

Les approches mises en oeuvre peuvent donc extrêmement variables suivant le niveau des exploitations, mais doivent dans tous les cas rester très pragmatiques, sans perdre de vue les objectifs d'un tel suivi.

Le choix des solutions retenues doit combiner des critères financiers avec les critères de faisabilité de la mise en oeuvre, compte-tenu du type de captage considéré ; les contraintes de maintenance et de vérification périodique du bon fonctionnement des dispositifs ne doivent pas être omises.

Un choix adapté des systèmes de gestion et d'exploitation des données acquises permet la mise en place de dispositifs de suivi de la qualité de l'eau exploitée et d'alerte en cas d'incident.

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	1
II.	OBJECTIFS DES MESURES	1
III.	ETAT DES LIEUX	2
	III.1 Généralités	2
	III.2 Paramètres mesurés	2
	III.3 Gestion des données	3
IV.	APPROCHE RECOMMANDABLE	3
	IV.1 Paramètres conseillés	4
	IV.2 Paramètres déconseillés	4
	IV.3 Positionnement des équipements	5
V.	GESTION DES DONNÉES	5
	V.1 Relevé manuel	5
	V.2	5
	V.3 Stockage informatique	6
VI.	EXPLOITATION DES DONNÉES DU SUIVI	6
VII.	CONCLUSION	7
	ANNEXE 1 : 3 exemples de gestion de données	8
	ANNEXE 2 : Principes des mesures	9
	1) <u>Capteur de conductivité à deux électrodes</u>	9
	2) <u>Capteur de conductivité à quatre électrodes</u>	9
	3) <u>Capteurs de conductivité à induction</u>	9
	4) <u>Débitmètres électromagnétiques</u>	10
	5) <u>Les débitmètres à ultrasons</u>	10

I. INTRODUCTION

Les eaux minérales naturelles sont réputées être de qualité physico-chimique stable ; de plus elles doivent être livrées au point d'utilisation telles qu'elles se présentent à l'émergence.

La réalisation de mesures - de contrôle de qualité - à l'émergence a donc été, de tout temps, une préoccupation constante.

Le progrès aidant, les techniques de captage ont évolué ; des aménagements de surface, on est passé aux captages par puits et maintenant par forage ; les techniques de métrologie utilisées ont donc également évolué.

A l'heure actuelle, les progrès de l'électronique aidant, mesurer, dans le domaine des eaux minérales, n'est plus un problème technique mais un problème de choix d'objectifs et de coûts.

Le programme de mesure mis en oeuvre sur un captage doit donc correspondre à un objectif clairement énoncé et être adapté au type de captage et au type d'eau concerné.

II. OBJECTIFS DES MESURES

Comme toutes les ressources naturelles du sous-sol, les eaux minérales font l'objet d'études préalables à leur mise en exploitation ; ces études déterminent notamment :

- la qualité de l'eau qui sera exploitée,
- le type de captage qui sera mis en oeuvre,
- les modalités et le régime d'exploitation envisagés pour le captage.

Ces éléments seront repris, après instruction des dossiers de demande correspondants, dans les arrêtés d'autorisation délivrés.

Ils détermineront également en partie les contrôles qui seront effectués en cours d'exploitation.

Les programmes de mesure mis en place vont donc correspondre à plusieurs démarches :

- suivi de la qualité de l'eau,
- contrôle du respect des conditions d'exploitation autorisées pour la ressource,
- suivi des paramètres d'exploitation du captage et éventuellement de ses équipements.

III. ETAT DES LIEUX

III.1 GÉNÉRALITÉS

Les situations rencontrées sur le terrain sont extrêmement diverses ; elles sont souvent fonction de la nature et de l'ancienneté du captage : il n'est pas exceptionnel de voir des émergences naturelles aménagées ("griffons") exploitées sans équipement de mesure à demeure, et faisant l'objet d'un suivi ponctuel (conductivité ? température ?) parfois sommaire, dont les résultats sont transcrits dans un cahier.

A l'inverse, le développement des réhabilitations d'ouvrages de captage anciens et la création de nouveaux forages de production, ont permis depuis la fin des années 1980, la mise en place de capteurs modernes permettant de couvrir à la fois les besoins de suivi réglementaire de la qualité de la ressource, et les besoins de gestion de l'exploitation des forages.

Dans les exploitations les plus évoluées, les équipements de mesure sont raccordés à des chaînes de traitement numérique, avec télégestion.

Cependant, d'une façon encore assez générale, l'intérêt de disposer de mesures fiables et le bénéfice à retirer d'une exploitation rationnelle de ces mesures fiables, n'est pas encore systématiquement perçu ou admis.

En effet, les contraintes que cela représente sont réelles :

- . L'investissement, qui peut s'évaluer entre 100 et 150 KF pour un équipement complet standard auquel s'ajoutent les frais de gestion et d'interprétation des données ainsi que les frais de maintenance, représentent systématiquement un obstacle.
- . selon la nature du captage considéré, son équipement en matériel de mesure peut être plus ou moins compliqué à réaliser (par exemple, mesures de faibles débits sur une émergence naturelle).
- . Les compétences nécessaires à la sélection, à la mise en place, et à la maintenance de ces équipements ne sont pas toujours présentes dans les exploitations d'eaux minérales ; la plupart de ces actions ainsi que la gestion informatique et le traitement des données doivent donc soit être précédées d'un programme de formation du personnel technique, soit être sous traitées à des tiers ;
- . Un matériel standard peut être défini, mais il doit être adapté à de nombreux paramètres locaux (faciès d'eau, réseau hydraulique, équipements de mesures et de régulations existants). En particulier les points d'émergences sont généralement isolés de la zone d'exploitation, donc de tout environnement industriel. Aussi des spécifications complémentaires au matériel de mesure et acquisition doivent être précisées concernant les câblages d'alimentations, le transfert de données, la gestion de l'hygrométrie, de la température du local et du risque lié à la foudre, les classes d'armoires électriques.

III.2 PARAMÈTRES MESURÉS

Les paramètres les plus couramment mesurés correspondent à deux préoccupations distinctes :

- suivi des paramètres caractéristiques de l'eau à l'émergence, pour se conformer à l'arrêté ministériel d'autorisation d'exploiter : ce sont en général la température et la conductivité électrique de l'eau, la pression (en tant qu'expression de la hauteur d'eau), le débit.
- suivi des paramètres relatifs au gisement et au matériel d'exploitation qui relèvent plus de l'autocontrôle mis en place par les exploitations : on retrouve :
 - . le débit ;
 - . la pression de refoulement, intégrant l'évolution de paramètre d'entrée (niveau/pression de ressource) et l'efficacité hydraulique des matériels (rendement des pompes, pertes de charge au refoulement) ;
 - . l'alimentation électrique, reflétant l'état des équipements électromécaniques.

Hormis les mesures piézométriques qui peuvent être réalisées en des points variables, l'ensemble de ces mesures est effectué au niveau de l'émergence.

La figure 1 montre un exemple de schéma d'instrumentation à l'émergence.

III.3 GESTION DES DONNÉES

Suivant le type de captage et d'équipement, la fréquence de mesure et la démarche, de formatage, de stockage et de traitement des données peuvent être extrêmement variables : depuis la consigne manuelle de données journalières dans un cahier, jusqu'à la solution "tout informatique" des installations modernes les plus évoluées, et ce d'autant plus qu'aucune contrainte réglementaire n'est imposée dans ce domaine.

Les points suivants méritent d'être relevés :

- La maintenance (nettoyage, étalonnage périodiques) des capteurs en place, laisse souvent à désirer.
- Les données recueillies ne font pas l'objet d'un traitement et d'une valorisation systématique.
- La communication aux administrations des données acquises par l'exploitant n'est pas prévue de façon explicite dans les textes et ne se fait que rarement d'une façon régulière.

IV. APPROCHE RECOMMANDABLE

Les contraintes financières et techniques de mise en place de matériel de mesure imposent une réflexion sur la représentativité et la simplicité des paramètres à prendre en compte.

L'évolution du matériel de métrologie met à disposition une multitude de capteurs ce qui peut entraîner la tentation de suréquiper les installations en mesurant le plus grand nombre de paramètres.

Cette tendance se traduit parfois par une redondance d'informations entre différentes mesures mettant surtout en évidence le manque d'étalonnage ou la dérive des capteurs.

Par ailleurs, l'éloignement et les conditions environnementales des captages ne permettent pas la mise en oeuvre de matériel sophistiqué ou nécessitant des réglages fréquents.

Il importe donc de rester très pragmatique dans ce domaine : ainsi, il y a lieu de séparer les mesures à l'émergence, fiables et représentatives, ayant pour objectif une alerte liée à une dérive, de mesures au niveau de l'exploitation qui peuvent être qualifiées d'autocontrôle, en routine ou sur anomalie ; ces dernières relevant du libre arbitre de l'exploitant, ne seront pas traitées dans cette note.

IV.1 PARAMÈTRES CONSEILLÉS

- la température : les capteurs sont fiables, économiques (coût # 1,5 KF) d'un entretien facile ; la stabilité de la température de l'eau est un bon reflet de l'absence de perturbation de l'eau minérale par des phénomènes extérieurs (infiltration, mélanges).
- la conductivité électrique de l'eau, calée sur des analyses chimiques permet de suivre de manière globale la qualité chimique de l'eau (minéralisation) : c'est un paramètre commode à suivre ; par contre, les capteurs sont onéreux (# 12 KF), délicats et doivent faire l'objet d'un entretien et de réétalonnages périodiques (solution étalon de KCl de conductivité connue). Les capteurs peuvent être des capteurs classiques à deux électrodes, ou le cas échéant à 4 électrodes (deux électrodes de mesure et deux électrodes de compensation de l'état de surface). Ce peuvent être également des capteurs à induction (voir principe de fonctionnement en annexe). Ils doivent également être positionnés selon les spécifications précises du constructeur sous peine de donner des indications aberrantes. Enfin, la plage de sensibilité du capteur doit être adaptée à la minéralisation de l'eau.
- les mesures de pression : on peut suivant le cas, mesurer la pression de fond, la pression de refoulement de la pompe immergée. Les câbles et les membranes des capteurs doivent être adaptés au caractère corrosif éventuel du milieu (coût d'un capteur # 6 KF).

NB : *Pour les eaux plates, la pression de fond peut être convertie directement en termes de hauteurs d'eau. Par contre, attention au cas des eaux gazeuses pour lesquelles il n'existe pas de relation directe entre pression de fond et hauteurs de la colonne d'eau (cf Note technique n° 10).*

Pour ces eaux, le suivi de la pression de fond ne donne directement accès qu'à des informations approchées, équivalentes à des hauteurs d'eaux fictives mais permettant de suivre les risques éventuels de dénoyage de la pompe, ou de constater l'évolution éventuelle dans le temps des caractéristiques du gisement exploité.

- le débit : on doit préférer les débitmètres sans pièces mobiles, plus fiables dans le temps (électromagnétiques, le plus souvent, ultrasonique) ; coût moyen de l'ordre de 12 KF (voir principe de fonctionnement en annexe).

Ces quatre paramètres sont essentiels au suivi de la qualité. On peut éventuellement leur associer dans certains cas particuliers un paramètre chimique complémentaire caractéristique (chlorure par exemple) dont le choix sera fonction du type d'eau minérale, et également du type de risque que l'on peut chercher à prévenir.

IV.2 PARAMÈTRES DÉCONSEILLÉS

Les mesures de pH sont faciles à réaliser, mais ne sont pas directement exploitables. Il en est de même des mesures d'oxygène dissous, de CO², ou de sulfures.

D'une façon générale, les mesures de concentration d'espèces dissoutes seront de préférence réalisées manuellement, de façon ponctuelle, afin de répondre à des questions précises ; leur suivi en continu présente, sauf cas particulier, peu d'intérêt.

IV.3 POSITIONNEMENT DES ÉQUIPEMENTS

Sur les émergences naturelles aménagées, chaque cas est particulier et il faut surtout faire preuve de bon sens dans les aménagements nécessaires à la réalisation de mesures dans de bonnes conditions.

Par contre, des règles générales peuvent être avancées pour les forages.

Sur l'exemple de la fig. 1, on peut noter les points suivants :

- les capteurs sont situés sur un tronçon de canalisation monté en by-pass, qu'il est possible d'isoler (vanne amont et aval) pour les interventions d'entretien, sans être contraint d'arrêter l'exploitation. Ils sont situés aussi près que possible de la tête de puits, sans toutefois gêner les interventions éventuelles.

Ils sont situés sur la génératrice inférieure de la canalisation, afin de ne pas donner lieu à des accumulations de poches de gaz que pourraient perturber les mesures.

NB : On note en outre sur ce schéma :

- l'entrée d'air filtré (filtre microbien) permettant d'éviter l'introduction d'air non stérile dans l'annulaire du forage quand celui-ci respire (fluctuation du niveau dynamique en fonction du pompage).
- présence d'un clapet anti-retour, **sécurité indispensable** pour éviter, en cas d'incident, la vidange du retour des canalisations dans le forage avec tous les risques de pollution que cela comporte pour le gisement.
- présence du robinet de prélèvement pour prise d'échantillons de contrôle à l'émergence. Celui-ci doit obligatoirement être en acier inoxydable de façon à pouvoir être stérilisé à la flamme avant prélèvement.
- les pentes et les angles des canalisations sont conçus de façon à éviter les turbulences et les zones mortes.

V. GESTION DES DONNÉES

V.1 RELEVÉ MANUEL

Le relevé manuel sur afficheur, souvent pratiqué, est dans une certaine mesure paradoxal, s'agissant de données acquises à partir d'équipements en place et fonctionnant en automatique. Il entraîne nécessairement des pertes d'information sur les variations rapides, et des risques d'erreurs de transcription ou d'hétérogénéité liées aux rotations de personnel.

- V.2 L'enregistrement papier est interprétable sur une courte période, mais devient vite ingérable si l'on s'intéresse à une durée trop longue. Par ailleurs, il nécessite une saisie manuelle pour tout traitement plus approfondi (tendances à long terme, dérivés, historiques, ...)

V.3 STOCKAGE INFORMATIQUE

C'est, compte-tenu des possibilités offertes, la solution la plus satisfaisante, notamment dans le cas de mesures en continu en place.

De plus, l'investissement (de l'ordre de 7 KF) est comparable aux solutions précédentes, et permet des gains de temps importants au niveau de la gestion des données. Il offre enfin des solutions de continuité informatiques pour le traitement et l'interprétation des données.

V.4 Quelle que soit la solution choisie pour gérer les données du suivi, il convient de mettre l'accent, sur les points suivants :

- formation de personnel spécialisé,
- mise au point de modes opératoires précis,
- mise au point de procédures écrites claires de contrôle, de maintenance et de réétalonnage périodique des équipements,
- nécessité de visites régulières du captage et de ses équipements (même si on a choisi l'option "tout automatique").

VI. EXPLOITATION DES DONNÉES DU SUIVI

La réglementation existante ne prévoit rien d'explicite dans ce domaine.

Il est donc recommandé de faire preuve de bon sens, en sachant que l'objectif minimum à atteindre est que l'exploitant et l'administration disposent des informations nécessaires à la détection de toute altération significative de la qualité de l'eau exploitée.

L'exploitation de ces données doit pouvoir déboucher sur la mise en oeuvre de procédures prédéfinies :

- en cas de faible dérive constatée sur un ou des capteurs, vérification de leur bon fonctionnement et le cas échéant, diagnostic du caractère non instrumental de cette dérive.
- en cas d'évolution majeure d'un ou de plusieurs paramètres, modification des conditions d'exploitation ou arrêt.

La solution choisie pour le stockage des données prend alors tout son sens ; en effet, à ce stade, trois démarches de niveau différent peuvent être envisagées suivant le type et l'importance de l'exploitation.

- 1) comparaison des informations fournies par le suivi, avec des caractéristiques nominales : une alerte est déclenchée en cas de dépassement de seuil.
- 2) Confrontation des valeurs mesurées avec les valeurs fournies par un modèle d'évolution, (hydrodynamique essentiellement, gestion de la ressource souterraine).
- 3) A partir d'une base de données, alimentée automatiquement par les dispositifs de mesure, confrontation des valeurs avec des scénarios d'évolution ou des rapports de paramètres caractéristiques et interface avec toute l'information disponible sur le site : géologie, hydrogéologie, (qualité d'eau, équipements hydrauliques, réseaux de distribution, d'assainissement), bref avec tout ce que l'on sait sur le gisement exploité et son environnement proche.

Ces systèmes d'information commencent à se mettre en place sur les sites les plus intensément exploités et permettent un suivi et un diagnostic plus efficaces et par voie de conséquence, une meilleure gestion préventive des risques ainsi que des réponses plus adaptées en cas de dysfonctionnements constatés.

Quelle que soit la démarche choisie, une option supplémentaire intéressante consiste en la mise à disposition de ces informations sur un réseau (minitel ou réseau spécialisé) avec code d'accès confidentiel ; elle permet, tout en préservant la confidentialité des informations, de les mettre à disposition de destinataires choisis par l'exploitant.

On peut ainsi redéfinir de façon moderne la fonction de contrôle exercée par l'administration et la fonction d'assistance technique de bureaux spécialisés (consultation des données par le réseau, concertations téléphoniques, et déplacements sur site mieux ciblés, "en connaissance de cause").

VII. CONCLUSION

Le suivi d'exploitation des émergences d'eau minérale est un impératif qu'il convient de nuancer en tenant compte du type de captage concerné.

Le développement de l'exploitation par forage donne accès à toutes les solutions métrologique apportées par les progrès de l'électronique.

Il convient donc de sélectionner soigneusement les critères les plus utiles à suivre en évitant la redondance d'information, en sachant également que la mise en place de dispositifs de mesures doit nécessairement être complétée par une procédure de maintenance, de vérification de ces équipements ainsi qu'une réflexion portant sur l'utilisation la plus rationnelle des informations acquises.

ANNEXE 1 : 3 exemples de gestion de données

Exemple 1 - Fig. 2 : Mesures analogiques et enregistrement de la pression de refoulement ①, pression de fond ② et pression de l'annulaire ③ d'un puits en exploitation. Cet extrait provient d'une série d'enregistrements sur plusieurs mois, lors de la mise en exploitation d'un forage. On constate un mauvais réglage de la sensibilité soit du capteur de pression de refoulement soit de la bande correspondante de l'enregistrement : le tracé obtenu devrait avoir une allure analogue aux courbes 2 ou 3.

Il n'a pas été possible de retrouver les enregistrements sur lesquels sont portées les échelles de pression et de temps : ceci illustre l'un des inconvénients inhérents à cette solution.

En revanche, l'information acquise permettrait le cas échéant une visualisation immédiate de l'évolution à court terme.

Les tendances à long terme sont par contre impossible à appréhender, du fait des longueurs de papiers correspondantes.

Exemple 2 - Fig. 3 : Mesures de température, débit et conductivité transmises sous forme digitale via une centrale d'acquisition de données.

Ce système permet une gestion satisfaisante de l'information, au niveau de l'édition comme de l'interprétation.

On peut cependant constater que sur le schéma présenté, la gamme de conductivité sélectionnée ne permet pas une bonne visualisation des événements. En particulier sur la fin du graphique, on remarque une linéarité qui peut être attribuée soit à une panne de capteur, soit à une extrapolation à partir d'informations ponctuelles.

Exemple 3 - Fig. 4 : Solution plus sophistiquée : Mesures digitales avec centrale d'acquisition et logiciel de gestion de données. Cet exemple permet de stocker les diverses mesures mais aussi l'ensemble des informations d'un site (ressource et exploitation). Sur des exploitations relativement complexes (nombre d'émergences, quantité de données historiques, réseau de distribution, environnement, ...), ce système d'information amène des possibilités de suivis et diagnostics couvrant l'ensemble des données du site, c'est-à-dire replaçant les mesures dans un contexte global.

ANNEXE 2 : Principes des mesures

1) CAPTEUR DE CONDUCTIVITÉ À DEUX ÉLECTRODES

On applique une différence de potentiel entre deux électrodes immergées dans l'eau dont on cherche à mesurer la conductivité.

Celle-ci sera plus ou moins conductrice (ou résistante) en fonction de sa minéralisation. L'intensité du courant obtenue sera fonction de la différence du potentiel appliqué et de la salinité de l'eau ($U = R.I$).

2) CAPTEUR DE CONDUCTIVITÉ À QUATRE ÉLECTRODES

On fait appel à deux électrodes supplémentaires, qui permettent d'appliquer à la mesure une correction liée à l'état de surface des électrodes de mesure : c'est donc une solution particulièrement adaptée aux eaux ayant tendance à encrasser les électrodes.

3) CAPTEURS DE CONDUCTIVITÉ À INDUCTION

Ces capteurs n'utilisent pas d'électrode ; la mesure est basée sur le couplage inductif de deux transformateurs annulaires (tores) par le fluide.

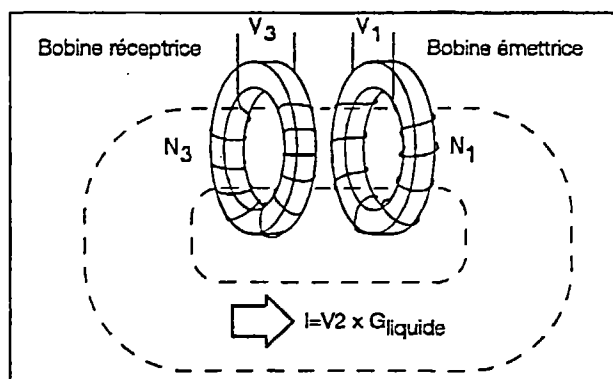
Le transmetteur fournit une tension de référence (V_1) à haute fréquence à la bobine émettrice. Le support de cette bobine consiste en un matériau magnétique à haute perméabilité et un champ magnétique important est généré dans le tore. Le liquide traverse l'ouverture du tore et peut être considéré comme boucle secondaire.

Le champ magnétique induit une tension V_2 dans la boucle secondaire. Le courant induit dans la boucle liquide est proportionnel à cette tension et la conductivité de la boucle liquide est donnée par la loi d'Ohm.

La conductivité ($G=1/R$) est proportionnelle à la conductivité spécifique et à un facteur constant qui est déterminé par la géométrie du capteur (longueur divisée par la surface de l'orifice du tore) et par l'installation du capteur.

Deux tores sont montés dans le capteur en forme d'anneau. Le liquide traverse aussi le second tore et c'est pourquoi la boucle liquide peut être considérée comme un bobinage primaire du second transformateur torique.

Le courant présent dans le liquide crée un champ magnétique dans le second tore. La tension induite (V_3), résultant de ce champ magnétique peut être mesurée en sortie. En effet, la tension de sortie de cette bobine réceptrice est proportionnelle à la conductivité spécifique du liquide de procédé.



Principe de mesure de conductivité inductive

4) DÉBITMÈTRES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

L'eau qui s'écoule dans un tube isolant, est soumise à un champ magnétique d'intensité constante connue, perpendiculaire à l'axe d'écoulement. Elle se comporte comme un conducteur électrique se déplaçant dans un champ magnétique. Une force électromotrice prend naissance dans l'eau et il apparaît, entre deux électrodes disposées perpendiculairement au champ magnétique et baignant dans l'eau, une différence de potentiel U qui s'exprime par la formule : $U = k.D.V.H.$ dans laquelle D , V et H sont respectivement le diamètre intérieur du tube isolant, la vitesse de l'eau et la valeur du champ magnétique et k est une constante.

L'avantage de ce débitmètre est aussi de ne créer aucune perte de charge ; la différence de potentiel recueillie aux bornes des électrodes étant proportionnelle à la vitesse du fluide, l'indication du débit est linéaire et ne nécessite pas d'appareillage complémentaire.

5) LES DÉBITMÈTRES À ULTRASONS

Les débitmètres à ultrasons dits "à temps de transit", sont basés sur le principe suivant : si deux sondes (émettrice et réceptrice) à ultrasons sont placées au sein d'un liquide en mouvement de telle façon que chacune d'elles reçoive les signaux émis par la sonde opposée, on observe une différence de temps de propagation suivant que l'onde acoustique se propage d'amont en aval ou d'aval en amont (composition des vitesses).

En appelant :

v la vitesse d'écoulement,

d la distance entre sondes,

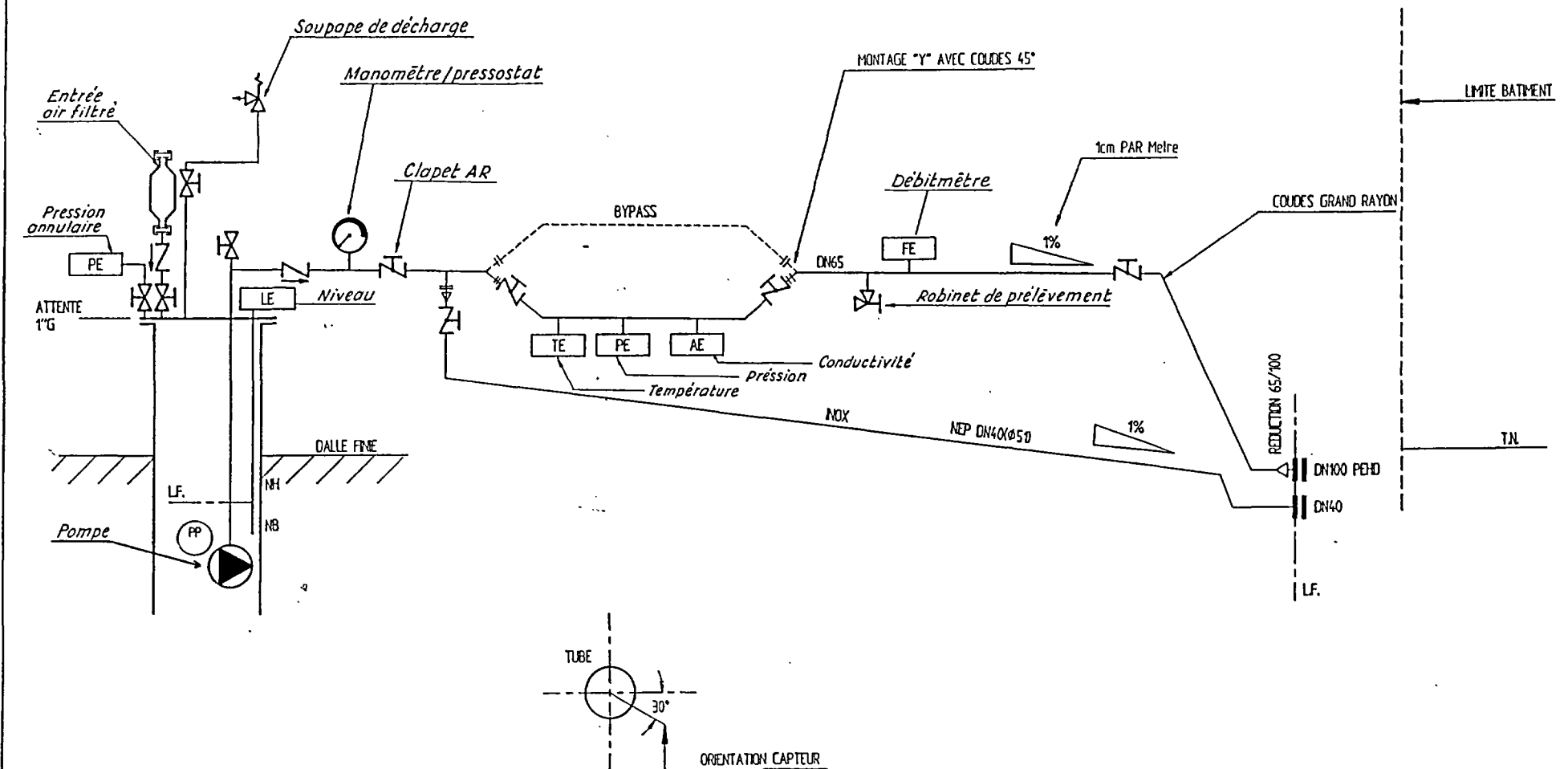
c la célérité du son dans le milieu,

θ l'angle entre le vecteur vitesse et la direction des sondes,

la différence de temps de parcours s'écrit :

$$\Delta T = \frac{2 \, v d \cos \theta}{c^2}$$

Cette relation permet de déduire la vitesse du fluide, qui, rapportée à la section, donne accès au débit.



Document ANTEA

Figure 1 : Schéma d'instrumentation à l'émérgence

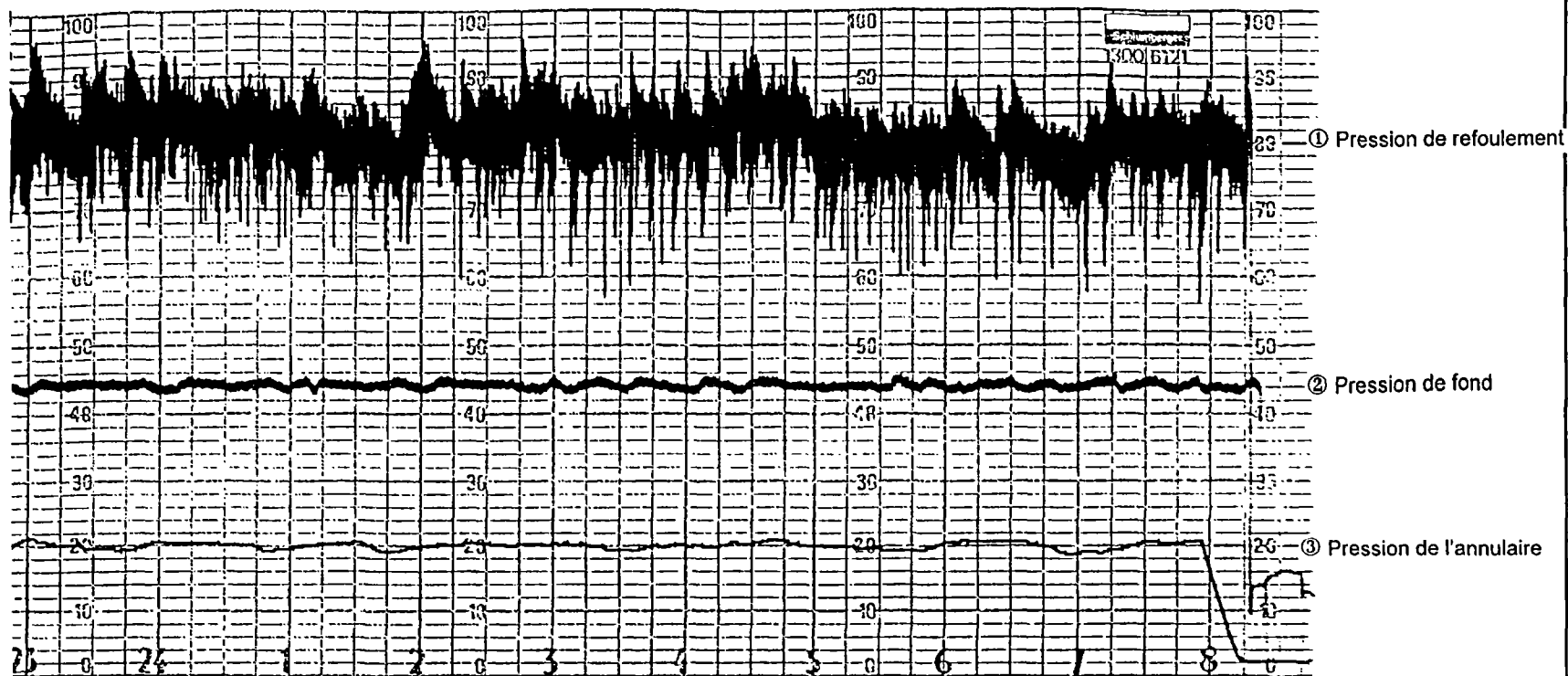


Figure 2 - Exemple de mesures analogiques avec enregistrement papier

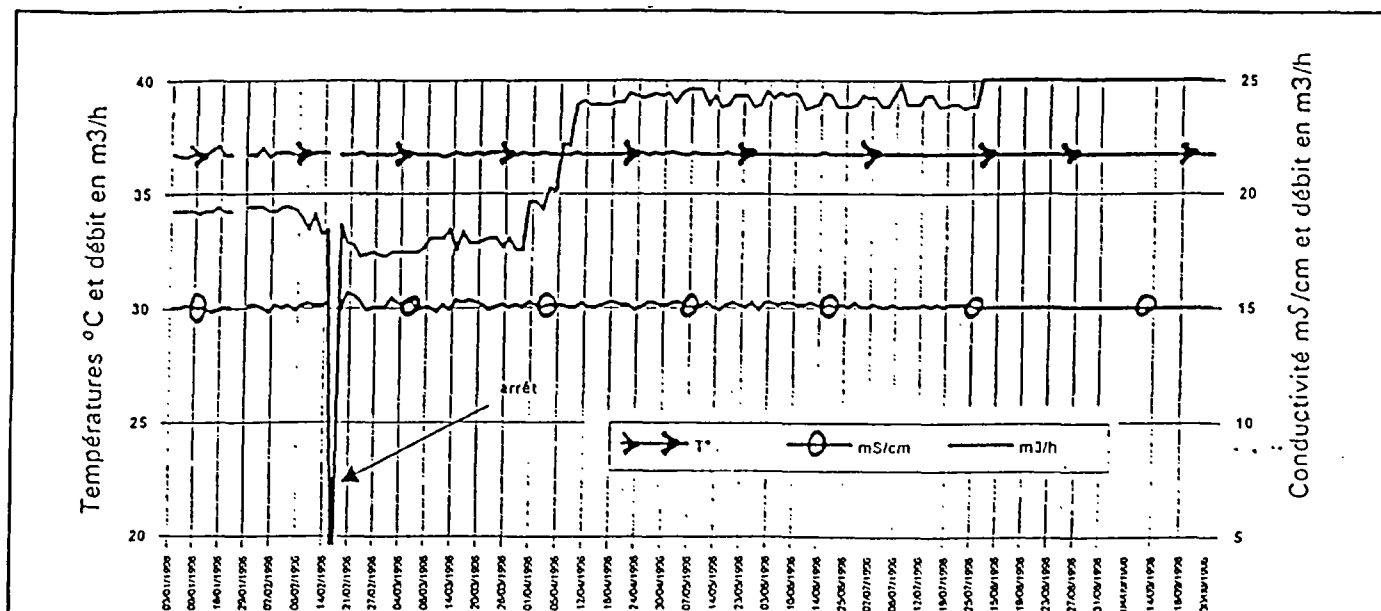


Figure 3 - Exemple de mesures digitales avec centrale d'acquisition

BADGE : BAs de Données pour la Gestion des Eaux

Fichier Edition Affichage Enregistrements Fenêtre 2

PARAMÈTRES PHYSIQUES

Station: BAIG4 Analyser: Piézométrie
 Lieu prélèv Baignots 4 Du: 01/01/82
 Nature FORAGE THERMAL Au: 31/03/96

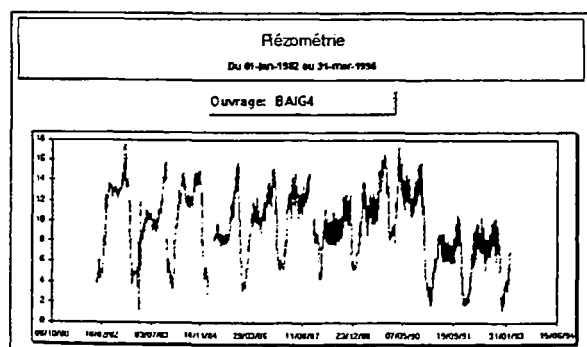
Date	Débit	Pression	Tempér.	Piézo.	Cote NGF	Observation
13/01/82	65		52.0	4.40	995.60	
14/01/82	65		52.0	4.40	995.60	
15/01/82	62		52.0	4.50	995.50	
16/01/82	62		52.0	5.20	994.80	
17/01/82	65		51.5	5.30	994.70	
18/01/82	65		51.5	5.30	994.70	
19/01/82	65		52.0	6.00	994.00	
20/01/82	85		52.0	6.10	993.90	Sec
21/01/82	85		52.0	6.40	993.60	Impossible
22/01/82	85		52.0	6.45	993.55	Hors service
23/01/82	85		52.0	5.90	994.10	Inaccessible
24/01/82	85		52.0	4.80	995.20	Non Mesuré
25/01/82	85		52.0	4.40	995.60	

Enr: 18 sur 5117

Enr: 2 sur 19

Exemple d'écran de gestion des données chronologiques

- La partie interne de l'écran est un tableau contenant l'ensemble des mesures réalisées sur un ouvrage ; celles-ci sont triées par dates croissantes ou décroissantes.
- La partie externe permet de choisir l'ouvrage à afficher dans le tableau, et d'analyser les paramètres mesurés : tracés graphiques, statistiques élémentaires et exportation vers EXCEL™.



Affichage d'un graphe de contrôle

STATISTIQUES ELEM ENTAIRES SUR LES DONNEES					
Ouvrage BAIG4		Entre le 01-jan-82 et le 31-mar-96			
Paramètre	Compte	Mini	Maxi	Moyenne	Ec.type
Débit	3070	0.00	35136.00	211.42	2188.17
Piezométrie	5106	0.90	17.70	9.21	3.52
Cote NGF	5106	982.30	999.10	990.79	3.52
Pression	1437	1.60	8.60	4.85	0.76
Température	4422	0.00	56.90	53.41	2.06

Affichage de statistiques élémentaires

Figure 4 : Exemple de mesures digitales avec centrale d'acquisition et logiciel de gestion de données (système BADGE)

BRGM
SERVICE SGN.UPE.CTEau.Antenne Eau Minérale
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. : (33) 02.38.64.34.34