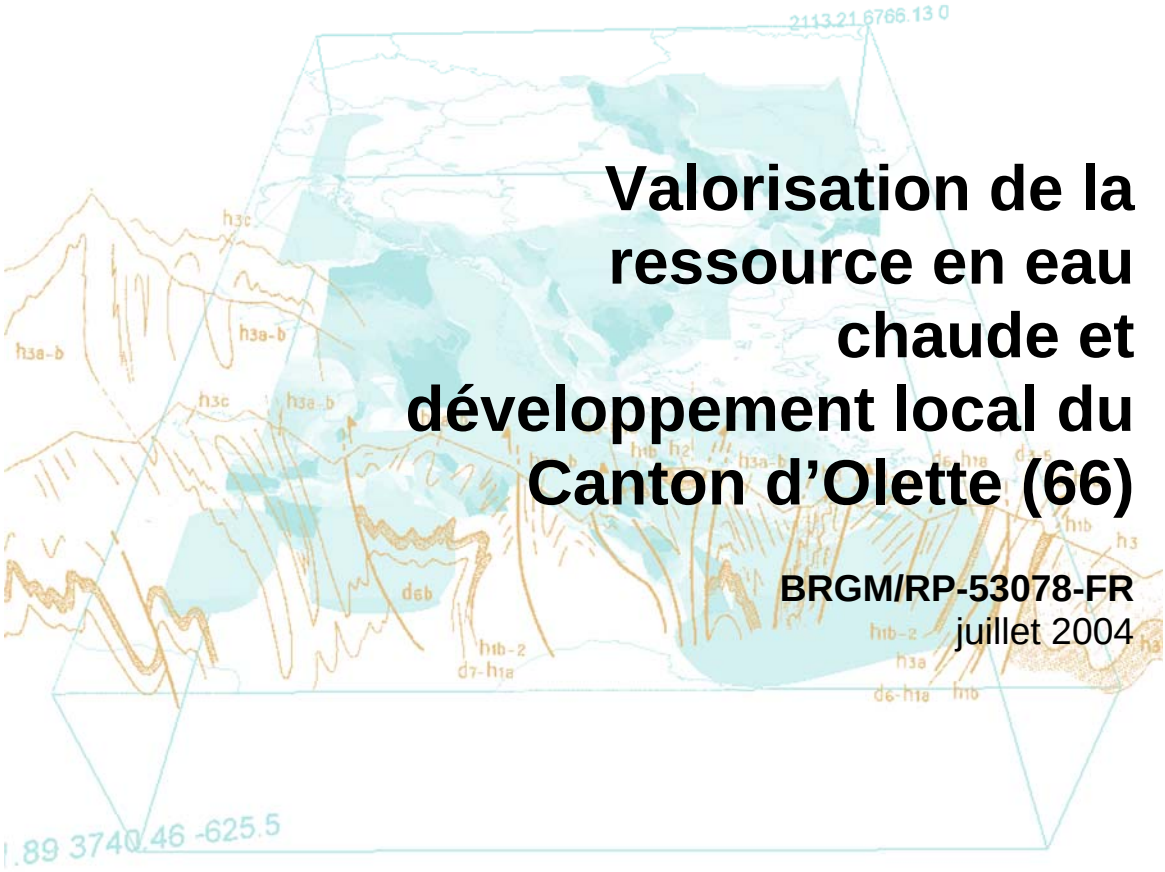
Document public



Valorisation de la ressource en eau chaude et développement local du Canton d'Olette (66)

BRGM/RP-53078-FR
juillet 2004

SIDEC

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Valorisation de la ressource en eau chaude et développement local du Canton d'Olette (66)

BRGM/RP-53078-FR
juillet 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 03EAUH12

N. Courtois, P. Le Strat
Avec la collaboration de
P. Vigouroux

SIDEC

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Pyrénées-Orientales, Canton d'Olette, Canaveilles, Nyer, Thuès-entre-Valls, Thuès-les-Bains, sources, eaux thermales, développement économique local, reconnaissances géologiques et environnementales, analyses physico-chimiques, analyses isotopiques.

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

Courtois N., Le Strat P., avec la collaboration de P. Vigouroux (2004) - Valorisation de la ressource en eau chaude et développement local du Canton d'Olette (66). BRGM/RP-53078-FR, 153 p., 62 ill., 5 ann.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de ses missions de service public, le BRGM a établi une convention de recherche et de développement partagés avec le SIDECO, Syndicat Intercommunal de Développement du Canton d'Olette, dans les Pyrénées Orientales. Pour contribuer à la dynamique de développement local liée à des activités novatrices, le SIDECO a chargé le BRGM d'un programme d'étude sur le potentiel en eaux thermo-minérales du secteur, en vue d'apprécier les possibilités d'une valorisation de cette ressource. Cette étude est centrée plus particulièrement sur les trois communes de Canaveilles-Llar, Nyer-En, et Thuès-entre-Valls, à replacer dans le contexte plus général des Pyrénées Orientales, marquées par la présence de nombreuses sources d'eaux chaudes sulfureuses, actuellement exploitées ou non (centres thermaux, centre de réadaptation fonctionnelle, thermo-ludisme,…).

La première étape du programme d'étude, dont les résultats sont présentés dans ce rapport, s'est fixée pour objectifs principaux d'obtenir une première caractérisation du gisement d'eau chaude (analyse des contextes géologique, hydrogéologique et environnemental, collecte et synthèse des données existantes, évaluation de la qualité des eaux…), et de définir des zones favorables pour la recherche de ressources complémentaires éventuelles (recommandations pour des investigations : campagnes de mesures géophysiques, sondages de reconnaissance).

Les résultats conjoints du contexte géologique, et des analyses chimiques effectuées sur quatre sources, semblent indiquer la présence d'un gisement aux potentialités importantes, qui sont liées à la présence d'une cellule hydrothermale de grande ampleur, et en relation avec la faille majeure de la Têt et/ou ses failles satellites.

Dans le Canton d'Olette, si les eaux thermales présentent des variations importantes au niveau des températures d'émergence (de 45°C à 75°C), par contre leurs profils géochimiques sont très similaires, à quelques détails près, et marqués par une minéralisation peu accentuée, et des teneurs importantes en fluorures.

Les analyses isotopiques pratiquées dans le cadre de cette étude ont permis d'estimer l'altitude de l'aire d'infiltration aux environs de 2100 m (ce qui la situe en contexte montagneux, donc quasi exempt de facteurs potentiels de pollution), et le temps de transit entre l'infiltration et l'émergence à 50 ans minimum. Ces deux aspects militent pour une bonne protection naturelle du gisement.

La vulnérabilité de la ressource est donc directement liée à celle du captage, vulnérabilité qui pourra être réduite par mise en place de forages effectués dans les règles de l'art, protégés des infiltrations d'eaux superficielles, et de périmètres sanitaires d'émergence efficaces.

Pour les futurs projets de développement local, le point clé ne sera sans doute pas la ressource potentielle en elle-même, qui est présente, mais plus vraisemblablement :

- les conditions d'exploitation de la ressource (difficulté d'accès aux sites pour les engins de forage, difficultés d'acheminement si les projets sont éloignés des sites de production,…) d'une part,

- les projets en eux-mêmes, qui devront être économiquement viables, et pour lesquels les différents maîtres d'ouvrage devront tenir compte de leur proximité pour éviter la mise en concurrence de projets similaires

Sommaire

1. Introduction 13

1.1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET PROGRAMME DE L'ÉTUDE 13

1.1.1. Contexte et objectifs 13

1.1.2. Programme de l'étude 13

1.1.3. Méthodologie mise en œuvre 14

1.2. NOTIONS SUR LES GISEMENTS D'EAUX THERMOMINÉRALES 17

1.2.1. La notion de gisement d'eau minérale 17

1.2.2. Des eaux minérales et thermales 18

2. Situations géographique, climatologique et hydrographique 21

2.1. PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA TÊT 21

2.1.1. Orographie et climatologie 21

2.1.2. Situation hydrologique de la Têt 22

2.2. PRÉSENTATION DES COMMUNES ET DES SOURCES THERMALES 25

2.2.1. Commune de Thuès-entre-Valls 27

2.2.2. Commune de Canaveilles-Llar 30

2.2.3. Commune de Nyer-En 36

3. Contexte géologique des sources 41

3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL 41

3.1.1. Structure géologique actuelle des Pyrénées 41

3.1.2. De l'orogenèse hercynienne à l'orogenèse pyrénéenne 46

3.1.3. L'histoire miocène (III) 48

3.1.4. L'histoire plio-quaternaire 49

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE LOCAL 49

3.2.1. La faille de Prades, un drain pour le mouvement des eaux « per ascensum »50

3.2.2. Une zone d'infiltration : mouvement des eaux « per descensum » 51

3.2.3. Un massif réservoir : le massif du Canigou 52

3.2.4. La structuration du massif réservoir..... 53

3.2.5. L'ouverture des objets structuraux..... 56

3.3. LA GÉOLOGIE DES SOURCES AU CAS PAR CAS 56

3.3.1. Cartographie des linéaments et de la stratification à partir des photos aériennes..... 56

3.3.2. Les zones des différentes sources en détail..... 57

3.4. CONCLUSION 65

4. Evaluation de la qualité des eaux thermales 70

4.1. OBJECTIFS, SOURCES ET PARAMETRES MESURES 70

4.1.1. Paramètres recherchés 70

4.1.2. Choix des sources échantillonnées 71

4.1.3. Quelques notions sur la chimie des eaux souterraines..... 71

4.2. ANALYSES CHIMIQUES SUR LES SOURCES..... 73

4.2.1. Anions et cations majeurs..... 74

4.2.2. Anions et cations en trace, micropolluants métalliques 78

4.2.3. Confrontation des résultats aux différentes normes de qualité..... 79

4.3. ANALYSES ISOTOPIQUES 80

4.3.1. Principes d'utilisation des isotopes stables et radioactifs 80

4.3.2. Utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau ^{18}O et ^{2}H 82

4.3.3. Utilisation du tritium ^{3}H 84

4.3.4. Résultats des analyses isotopiques sur les sources thermales 84

4.4. ESTIMATION DES TEMPÉRATURES EN PROFONDEUR 90

4.4.1. Utilisation des géothermomètres chimiques 90

4.4.2. Quelques résultats sur les sources 91

4.5. CONCLUSIONS 93

5. Contextes hydrogéologique et environnemental des sources 95

5.1. OBJECTIFS 95

5.2. CONTEXTES DES SITES 95

6. Définition de zones favorables pour des reconnaissances complémentaires 97

6.1. SECTEUR DE THUÈS-ENTRE-VALLS 97

6.1.1. Potentialités en eaux thermales 97

6.1.2. Secteurs favorables 98

6.2. SECTEUR DE CANAVEILLES 100

6.2.1. Potentialités en eaux thermales 100

6.2.2. Secteurs favorables 100

6.3. SECTEUR DE NYER 101

6.3.1. Zone de la source du Figuier 101

6.3.2. Secteur de Nyer village 103

6.4. REMARQUES SUR LES RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES 105

7. Conclusions et perspectives 107

7.1. DES EAUX THERMALES POUR DES PROJETS DE DÉVELOPPEMENT LOCAL107

7.2. APERÇU DU CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET ADMINISTRATIF 110

7.2.1. En matière d'eaux destinées à la consommation humaine 110

7.2.2. En matière d'eaux minérales naturelles et de thermalisme 110

7.2.3. En matière de réglementation sur les forages 111

7.2.4. En matière de géothermie 112

Liste des illustrations

Illustration 1 – Territoire du Parc Naturel Régional des Pyrénées Catalanes (AME, 2003) 16
Illustration 2 - Les systèmes hydrothermaux (Lopoukhine, 1995) 18
Illustration 3 - Débit moyen annuel de la Têt à différentes stations de jaugeage 23
Illustration 4 - Localisation du bassin versant de la Têt, et des principales sources thermales 24
Illustration 5 – Principales sources thermales des Pyrénées Orientales (d'après les Annales des Mines 1998)....25
Illustration 6 - Localisation des sources thermales sur Thuès-entre-Valls, Canaveilles et Nyer....26
Illustration 7 – Terrains communaux de Thuès-entre-Valls en rive droite de la Têt 28
Illustration 8 – Présentation de la commune de Thuès-lentre-Valls 29
Illustration 9 – Défilé des Graus de Canaveilles et sources thermales en rive gauche de la Têt 32
Illustration 10 – Source thermale dite "des bains" de Canaveilles....34
Illustration 11 – Accès à l'ancien "relais de l'Infante"....34
Illustration 12 – Présentation de la commune de Canaveilles....35
Illustration 13 – Accès à la source du Figuier 37
Illustration 14 – Emergence de la source du Figuier, en rive drite de la Têt 38
Illustration 15 – Situation de la source du Figuier....38
Illustration 16 – Présentation de la commune de Nyer 40
Illustration 17 – Morcellement des reliefs dans l'est des Pyrénées (Calvet, 1996) 42
Illustration 18 – Carte géologique schématique (Calvet, 1996)....43
Illustration 19 – Légende de l'Illustration 18 (Calvet, 1996)....44
Illustration 20 – Carte géologique et coupe structurale générale (Souquet et al., 1976&1977)....45
Illustration 21 – Collision de la plaque Ibérie avec la plaque Europe (Bousquet, 1997) 47
Illustration 22 – Coupe géologique interprétative des Pyrénées orientales (GEO-TER, 1996) 48
Illustration 23 – Photographie générale des sites....49
Illustration 24 – La faille de Prades (d'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000 du Brgm, édition 2004)....50
Illustration 25 – Schéma structural des failles de la Têt et de Py (d'après la notice de la carte géologique de Prades)....51

Illustration 26 – Coupe schématique du chevauchement mylonitique Nord-Canigou (d'après la notice de la carte géologique de Prades) 52

Illustration 27 – Un massif réservoir et une discordance progressive (d'après la notice de la carte géologique de Prades) 53

Illustration 28 – Positionnement de la faille de la Têt au niveau local (d'après la carte géologique 1/50 000 de Prades) 54

Illustration 29 – Coupe synthétique du contact entre les métasédiments (Formation de Canaveilles) et les "gneiss de transition" (d'après la notice de la carte géologique de Prades) 55

Illustration 30 – Le passage de la faille de la Têt dans la zone de Nyer 58

Illustration 31 – Passage de la faille satellite dans la zone de la source du Figuier 59

Illustration 32 – Foliation marquée dans les séries paléozoïques, près des Graus de Canaveilles 61

Illustration 33 – Passage de la faille de la Têt dans la zone de Thuès-les-Bains 63

Illustration 34 – Passage de la faille de la Têt dans la zone de Thuès-entre-Valls 64

Illustration 35 – Foliation et fracturaton du réservoir, visibles dans les Gorges de la Carança 65

Illustration 36 – Bloc diagramme interprétatif de la cellule hydrothermale du Canton d'Olette 66

Illustration 37 - Photointerprétation (sur fond de carte géologique au 1/50 000) 68

Illustration 38 - Photointerprétation (sur fond de carte IGN au 1/25 000) 69

Illustration 39 – Sources échantillonnées et paramètres mesurés 71

Illustration 40 - Interactions entre le cycle des roches et celui des eaux (d'après Sigg et al., 2000) 72

Illustration 41 – Représentation des analyses dans le diagramme de Piper 74

Illustration 42 – Résultats des analyses chimiques multi-élémentaires 76

Illustration 43 – Représentation des analyses dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff 77

Illustration 44 – Source de Saint-André, d'après les analyses de Bouisson-Bertrand 78

Illustration 45 – Comparaison des analyses avec les limites des 16 constituants relatifs aux eaux minérales naturelles (Annexe I de la Directive 2003/40/CD) 80

Illustration 46 - Caractéristiques de isotopes de la molécule d'eau 81

Illustration 47- Expression de la composition isotopique 82

Illustration 48- Droite de référence des eaux météoriques d'origine océanique à l'échelle mondiale (Craig, 1961) 83

Illustration 49 - Droite de référence des eaux météoriques du domaine méditerranéen oriental 83

Illustration 50- Droite de référence des eaux météoriques en Ardèche, en zone d'alimentation des sources du Vivarais (Fouillac, 1989) 83

Illustration 51- Gradients altimétriques pour les sources de l'Ardèche (Fouillac, 1989) 83

Illustration 52 – Résultats des analyses isotopiques sur les sources 85
Illustration 53 – Variations des compositions isotopiques en ^{18}O et ^{2}H pour les sources 86
Illustration 54 – Estimation des altitudes des aires de recharge des sources 86
Illustration 55 – Aires de recharge potentielles des sources 88
Illustration 56 – Equations géothermomètriques classiques 91
Illustration 57 – Résultats de l'application de quelques géothermomètres sur les sources 92
Illustration 58 – Températures estimées des réservoirs en profondeur en fonction de différents géothermomètres chimiques 93
Illustration 59 – Implantation de forages dans la zone de Thuès-entre-Valls 98
Illustration 60 – Définition de zones favorables, Thuès-entre-Valls 99
Illustration 61 - Définition de zones favorables, Canaveilles 102
Illustration 62 - Définition de zones favorables, Nyer 104

Liste des annexes

Annexe 1 - Contexte géologique régional des Pyrénées 115
Annexe 2 - Quelques notions sur les éléments chimiques 133
Annexe 3 - Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 « relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles » 137
Annexe 4 - Directive 2003/40/CE de la Commission du 16 mai 2003, « fixant la liste, les limites de concentration et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source » 143
Annexe 5 - Constitution d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'émergence 149

1. Introduction

Dans le cadre de ses missions de service public, le BRGM a établi une convention de recherche et de développement partagés avec le SIDECO (Syndicat Intercommunal de Développement du Canton d'Olette), assurant avec lui le cofinancement de cette étude, et qui concerne la valorisation des ressources en eau chaude et le développement local du canton d'Olette, dans les Pyrénées Orientales.

1.1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET PROGRAMME DE L'ÉTUDE

1.1.1. Contexte et objectifs

Le SIDECO est un syndicat intercommunal chargé du développement économique du canton d'Olette, dans le département des Pyrénées Orientales. Pour contribuer à la dynamique de développement liée à des activités novatrices, il a décidé d'étudier le potentiel des eaux thermo-minérales du secteur, en vue d'apprécier les possibilités d'une valorisation de cette ressource. Le SIDECO a chargé le BRGM d'un programme d'étude de la ressource en eaux thermo-minérales du Canton, situées sur les trois communes de **Canaveilles-Llar**, **Nyer-En**, et **Thuès-entre-Valls**.

Dans ces trois communes, la présence de sources d'eau chaude est connue depuis longtemps, et certaines d'entre elles sont ou ont été exploitées (usage domestique, thermalisme, tourisme, …). Mais, si elles constituent des indices tangibles d'un gisement « géothermique » et d'un potentiel de développement, il reste à montrer l'adéquation entre le gisement (caractérisation de ce gisement et localisation des émergences) et les projets de développement qui pourraient lui être associés.

1.1.2. Programme de l'étude

Pour caractériser cette adéquation, le partenariat public établi entre le SIDECO et le BRGM s'est fixé comme objectifs d'établir un état des connaissances et de proposer des perspectives sur les eaux thermo-minérales du secteur. Ceci constitue la **première étape** du programme d'étude, qui a été menée sur 11 mois, à compter de la signature de la convention en date du 29 juillet 2003, et dont les résultats sont présentés dans le présent rapport.

Cette première étape s'est fixé pour objectifs principaux d'obtenir une première caractérisation du gisement d'eau chaude (analyse des contextes géologique, hydrogéologique et environnemental, collecte et synthèse des données existantes,…), et de définir des zones favorables pour la recherche de ressources complémentaires éventuelles (recommandations pour des investigations).

Au vu des résultats obtenus à l'issue de cette première étape, une **seconde étape** pourra être envisagée pour affiner la caractérisation de la ressource en eaux chaudes

des secteurs identifiés, par mise en œuvre de reconnaissances complémentaires, telles que suivi quantitatif et qualitatif des émergences, techniques géophysiques, mesures d'émanation de gaz du sous-sol, ouvrages de reconnaissance, …

1.1.3. Méthodologie mise en œuvre

Les actions qui ont été menées au cours de cette étude se déclinent en 9 points :

1. Collecte et analyse critique des données existantes, auprès de différentes sources

- BRGM (inventaires des indices géothermiques, Banque du Sous-Sol, rapports,…) ;
- SIDECO (rapports d'études commanditées par ses membres,…) ;
- Publications scientifiques, données universitaires (thèses,…) ;
- DDAF, DDASS, DRIRE (résultats d'analyses,…).

2. Analyse du contexte géologique

Il s'est agi de caractériser le contexte géologique local et régional de chacun des sites, à partir d'investigations de terrain et d'interprétation de photos aériennes. Une analyse lithologique et structurale de détail a été menée afin de préciser les discontinuités du sous-sol (fissures, failles,…) susceptibles de favoriser le transit d'eau chaude jusqu'en surface. Il s'est agi également de fournir des éléments pour définir des zones favorables pour des reconnaissances émanométriques (mesures de gaz) et géophysiques prévues dans l'éventuelle étape 2.

3. Analyse du contexte hydrogéologique local

Des visites de terrain ont été effectuées aux abords des griffons afin de repérer des indices qui puissent donner des indications sur les modes d'émergence et sur son extension : émergences diffuses ou localisées, le long ou à l'intersection de lignes structurales bien marquées, etc… Ces visites avaient pour objectif de compléter l'analyse structurale, et d'aider à délimiter les secteurs les plus propices à des investigations complémentaires (géophysique et sondages de reconnaissance).

4. Approche environnementale locale

Il s'est agi de recaler la position relative de chaque émergence dans le contexte local (activités humaines et agricoles, voies de communication, …) afin d'apprécier les risques de contamination de l'eau, et de préciser les conditions naturelles de protection de la ressource (analyse de la vulnérabilité de la ressource).

5. Caractérisation physico-chimique et isotopique des eaux

Compte tenu des circulations souvent complexes des fluides, la caractérisation d'un gisement hydrothermal s'appuie fréquemment sur des analyses chimiques multi-élémentaires et des analyses isotopiques :

- les analyses multi-élémentaires (anions, cations, éléments trace) ont pour objectifs de caractériser le faciès géochimique des eaux, et d'apporter des éléments sur leur parcours entre les lieux d'infiltration et d'émergence (nature des roches traversées, température maximale atteinte en profondeur,…) ;

- les analyses des isotopes de la molécule d'eau (oxygène 18 ^{18}O, hydrogène lourd ^{2}H, et tritium ^{3}H) apportent quant à elles des éléments sur l'âge de l'eau et sur les secteurs d'infiltration.

Ces mesures permettent donc d'apporter des précisions sur l'origine des fluides et de mieux orienter les recommandations pour la protection des gisements.

Dans la convention signée en juillet 2003 pour cette première étape du programme d'étude, un budget spécifique pour la réalisation d'analyses n'avait été indiqué qu'en option. A l'issue de la collecte des données existantes et des premières investigations de terrain qui ont montré qu'il était possible de prélever in situ des échantillons fiables et représentatifs, il s'est avéré que ces analyses étaient intéressantes pour la caractérisation du gisement. Le BRGM a alors fait la proposition à SIDECO d'effectuer ces analyses. Le SIDECO a accepté la proposition, et un avenant à la convention a été signé en novembre 2003 pour la réalisation d'analyses physico-chimiques complètes et d'analyses des isotopes de l'eau sur certaines des sources thermales jugées les plus représentatives du Canton d'Olette.

6. Définition de zones favorables pour des reconnaissances complémentaires

A l'issue de l'analyse des données existantes, et de la caractérisation du gisement (phases 1 à 5), un ou plusieurs secteur(s) pourront être ciblés comme favorables pour des reconnaissances complémentaires en vue d'identifier de nouvelles ressources d'eau chaude, lors de l'étape 2. Le BRGM précisera la nature des travaux qu'il recommande d'entreprendre, et les raisons de ces choix.

7. Intégration des données sous forme cartographique

Les secteurs les plus favorables pour les projets de développement identifiés et potentiels sont définis sous forme cartographique à l'échelle du 1/25 000ème, sous forme de SIG (Système d'Information Géographique), et de façon à être compatibles avec la plate-forme utilisée par le Parc Naturel Régional des Pyrénées Catalanes (Illustration 1).

Les autres couches d'informations (géologie, résultats d'investigations in situ, définition de zones favorables,…) sont également intégrées sous forme cartographique.

8. Recommandations pour la protection de la ressource en eau (vulnérabilité)

A l'issue de la caractérisation du gisement, et des types d'utilisation envisagés (thermo-ludisme, tourisme, ….) l'étude précise, par secteur, des recommandations pour garantir la pérennité d'exploitation de la ressource d'eau chaude.

9. Présentation du contexte réglementaire et administratif

Enfin, les principaux aspects réglementaires qui régissent l'exploitation des eaux souterraines (eau minérale, alimentation en eau potable, loi sur l'eau, directives européennes) sont précisés pour permettre de juger des contraintes qui peuvent être liées au démarrage de projets.

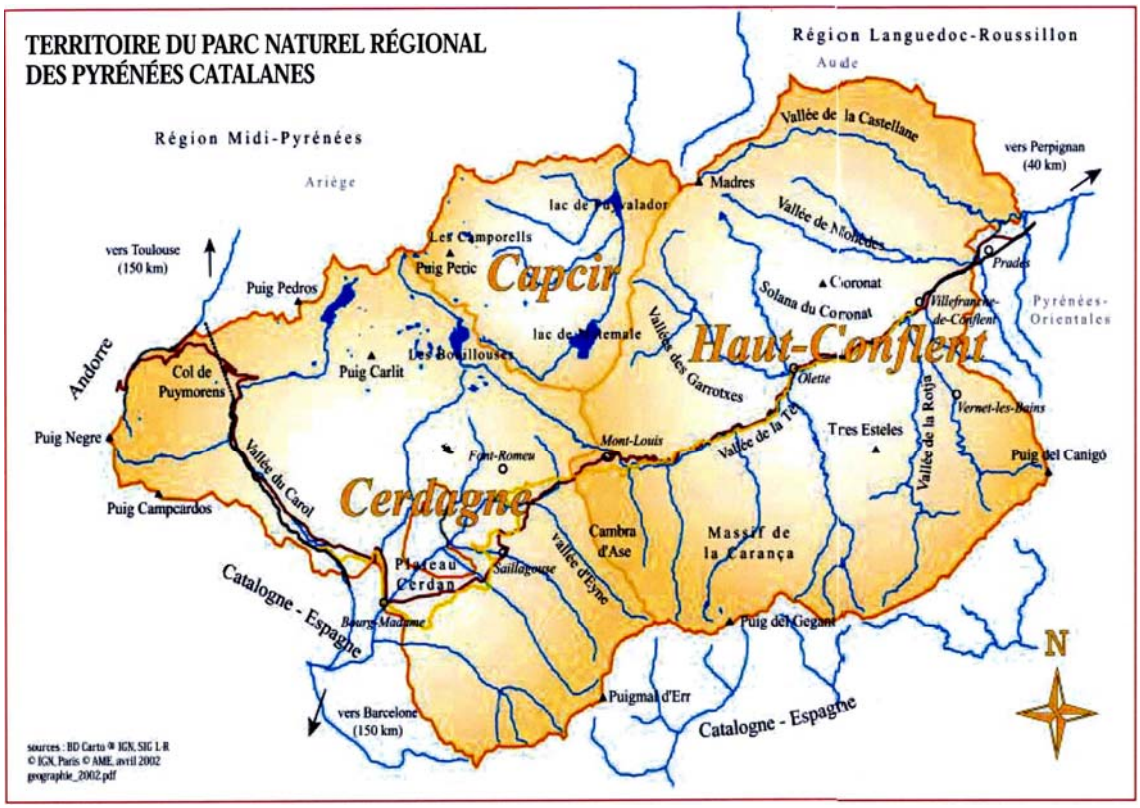


Illustration 1 – Territoire du Parc Naturel Régional des Pyrénées Catalanes (AME[1], 2003)

[1] Agence Méditerranéenne de l'Environnement (Disponible sur : http://www.ame-lr.org)

1.2. NOTIONS SUR LES GISEMENTS D'EAUX THERMOMINÉRALES

1.2.1. La notion de gisement d'eau minérale

Le 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. On peut distinguer ainsi (Illustration 2) :

- une **aire d'alimentation** avec infiltration des eaux de pluie. Il est maintenant reconnu que toutes les eaux minérales françaises ont une origine météorique et non juvénile[2] (Blavoux, 1995) ;
- un **réseau d'infiltration**, vaste en volume mais à vitesse d'écoulement très lente, à travers lequel l'eau descend et se réchauffe. La Terre produit en effet de la chaleur selon un flux correspondant à la désintégration des radionucléides présents dans la croûte terrestre, de 1 à 2 microcalories par seconde et par centimètre carré. Cette valeur est la moyenne pour le globe, elle peut être localement plus forte du fait de l'activité magmatique actuelle ou récente. Le gradient géothermique qui traduit ce flux est de l'ordre de +3°C/100m en moyenne. Lors de ce transit en profondeur, l'eau acquiert également sa **minéralisation**, qui va dépendre de multiples paramètres : conditions de température et de pression, nature des roches traversées, temps de contact, état d'équilibre de l'eau vis-à-vis des minéraux (sous-saturation, équilibre, sur-saturation,…) ;
- un axe de collecte agissant en drain et permettant la **remontée rapide** de l'eau minérale. Selon la vitesse de remontée, les échanges avec le terrain encaissant sont variables, mais le constat a été souvent fait que les pertes sont faibles et le régime stationnaire, ce qui a conduit le législateur à prendre en compte la stabilité en température comme une caractéristique essentielle des eaux minérales naturelles (Pouchan, 1995).

Durant la phase de remontée, l'eau minérale est le siège de phénomènes physico-chimiques qui vont modifier son état initial (Gadalia, 1995) :

- baisse de pression qui va conduire à la détente de gaz, certains inertes du point de vue chimique (gaz rares, azote N_2), et d'autres comme le gaz carbonique CO_2 ou le sulfure d'hydrogène H_2S, qui vont modifier les équilibres acido-basiques et/ou d'oxydoréduction ;
- oxydation, lors du contact avec l'atmosphère à l'émergence, ou par mélange avec des eaux superficielles plus riches en oxygène dissous ;
- variations de températures, qui affectent les équilibres chimiques ;
- dissolution/précipitation de phases minérales, qui peuvent avoir plusieurs origines : l'eau profonde peut rencontrer en ascension des associations minérales nouvelles vis-à-vis desquelles elle sera sur- ou sous-saturée, le dégazage de CO_2 entraîne

[2] Se dit d'une eau qui a une origine profonde (volcanique ou magmatique) et qui ne provient pas des précipitations.

généralement une précipitation de carbonates, la baisse de température favorise les dépôts de silice, …

- mélange avec des eaux plus superficielles.

Pour être complète, la connaissance d'un gisement d'eau minérale doit donc englober celle de l'origine de l'eau et de sa minéralisation en profondeur, et celle de son parcours depuis les parties profondes jusqu'à l'émergence.

L'**âge de l'eau** est défini comme le temps de transit entre la zone d'infiltration des pluies et l'émergence.

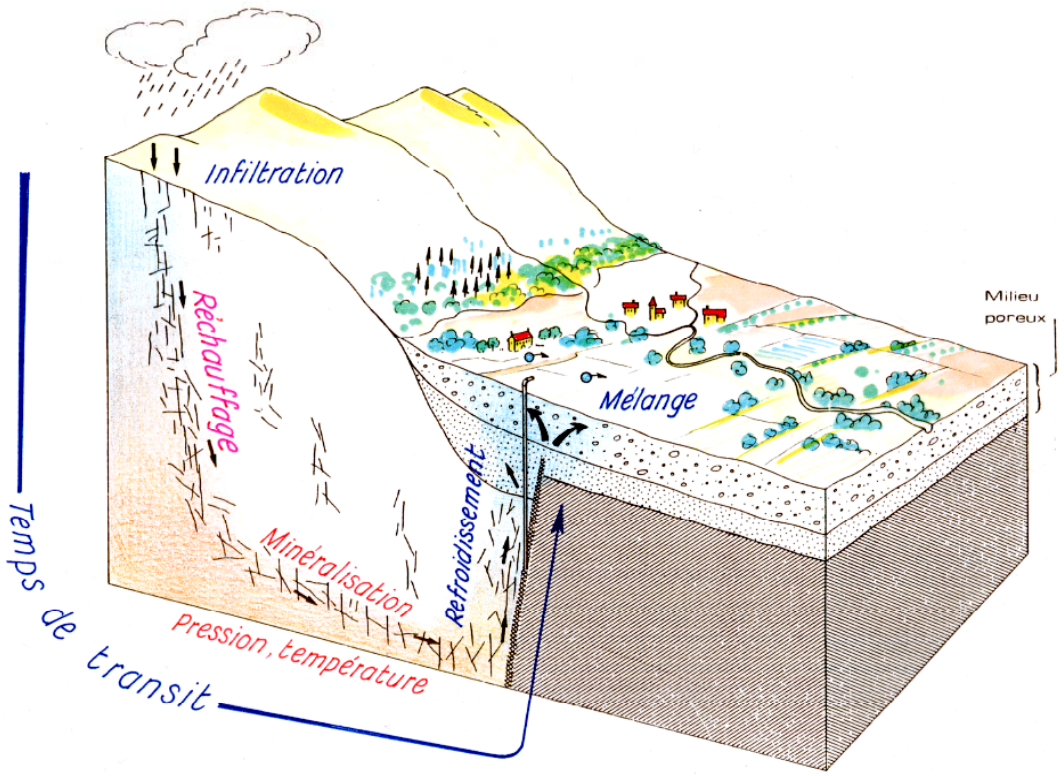


Illustration 2 - Les systèmes hydrothermaux (Lopoukhine, 1995)

1.2.2. Des eaux minérales et thermales

Les eaux dites thermominérales sont des eaux minérales marquées par des températures élevées à l'émergence.

C'est au cours de leur descente vers les profondeurs que les eaux de pluie infiltrées se réchauffent au contact avec les roches encaissantes. Comme indiqué précédemment, le **gradient géothermique moyen est de +3°C/100m**, mais il peut atteindre

localement et exceptionnellement 10 fois cette valeur (Pouchan, 1995). Une des causes possibles de ces « points chauds » peut être la présence à faible profondeur de roches en fusion dans des régions marquées par une activité volcanique récente.

L'émergence thermominérale est un point sur la surface du sol qui correspond à un axe mettant en relation les horizons géologiques profonds et la surface. Soumises à de fortes températures et pressions dans le réservoir géothermal, les eaux remontent des profondeurs à la faveur d'un axe par phénomène d'advection sous conditions thermo-artésiennes (Raymahashay, 1996). La possibilité de montée rapide et d'émergence de l'eau implique la présence d'un **axe de fracturation ouverte**, le plus souvent lié à l'intersection d'au moins deux plans de faille.

La température des eaux à l'émergence est une indication de la température minimale acquise en profondeur (car des pertes d'énergie calorifique ont lieu lors de la remontée, et des mélanges avec des eaux superficielles sont possibles). En prenant l'hypothèse d'un gradient géothermique moyen, on peut ainsi accéder facilement à une première estimation de la profondeur minimale de circulation.

La détermination de la **température à l'origine**, c'est-à-dire celle de l'aquifère profond faisant office de réservoir géothermal, a fait l'objet ces dernières années de recherches plus poussées notamment dans le domaine de la géochimie. Elles ont permis la mise en œuvre de « géothermomètres » (Pouchan, 1995), dont le principe fondamental est basé sur la dépendance de la solubilité des minéraux (et donc en conséquence des équilibres chimiques eau-roche encaissante) avec la température. Les teneurs en certains éléments chimiques des eaux thermales à l'émergence permettent alors, moyennant certaines hypothèses, d'estimer la température maximale atteinte en profondeur.

2. Situations géographique, climatologique et hydrographique

2.1. PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA TÊT

2.1.1. Orographie et climatologie

Le département des Pyrénées-Orientales est tout en contrastes.

Un contraste de relief d'abord. Plusieurs massifs montagneux représentent l'essentiel de sa surface : le massif du Carlit (2921 m) à l'ouest, le massif du Canigou (2784 m) entre les vallées de la Têt et du Tech, et le massif des Albères en bordure sud. En revanche, dans les vastes plaines du Roussillon (850 km^2) qui s'ouvrent à l'est sur le Golfe du Lion, l'altitude ne dépasse pas 200 m. Le littoral de direction principale Nord-Sud est constitué d'un cordon de dunes qui abrite une zone basse marécageuse et des étangs.

Un contraste climatologique ensuite. Le département est soumis à un climat de type méditerranéen tempéré, mais le relief et la proximité de la mer entraînent des contrastes notables : contrastes climatiques plus accentués, températures plus basses (températures moyennes annuelles de 2,5 à 15°C), et pluies plus abondantes dans les secteurs montagneux que dans les vallées et les plaines.

Les précipitations les plus faibles sont observées dans la vallée de la Têt en aval de Prades, et les plus fortes sur le Canigou, en particulier sur son versant sud (Vallespir). La pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1970-1989 est de 553 mm à Vinça, et de 1325 mm au Chalet-des-Cortalets, situé à l'altitude 2150 m dans le massif du Canigou.

Ces précipitations peuvent être très variables d'une année à l'autre. Pour la station de Perpignan, si la moyenne annuelle sur la période de référence 1946-1993 est de 579 mm, les années 1964 et 1992 ont été particulièrement pluvieuses (respectivement 1084 et 1009 mm), et la période 1973-1976 est la plus sèche avec une moyenne de 383 mm.

Pour la station de Perpignan , la moyenne annuelle du nombre de jours de pluie est de 89 sur la période 1946-1993. Ces pluies sont en général brèves et violentes : par exemple, le 26 septembre 1992 près de Perpignan, 202 mm sont tombés en 12,5 heures, dont 166 mm en 3 heures (Chabart, 1996).

2.1.2. Situation hydrologique de la Têt

Le département des Pyrénées Orientales peut être subdivisé en 8 bassins versants, ceux des trois petits fleuves côtiers de l'Agly, de la Têt et du Tech, dépendants de la Méditerranée, étant les plus importants.

Avec une longueur de 114 km, un bassin versant global de 1417 km^2 (1280 km^2 à Perpignan), et un débit moyen annuel de l'ordre de 13 m^3/s, la Têt est la rivière la plus importante du Roussillon. Elle prend sa source à 2450 m d'altitude (Lac Bleu), au pied du Pic du Prigue, dans le massif du Carlit, parcourt la Cerdagne jusqu'à Mont-Louis, traverse le Conflent jusqu'à Vinça, où elle quitte la montagne pour entrer dans la plaine du Roussillon. 47% de la surface du bassin versant de la Têt se situent entre 1000 et 2000 mètres d'altitude (Illustration 4).

Le bassin versant de la Têt peut être subdivisé en trois parties :

- la partie supérieure, des sources à Mont-Louis, qui comprend de vastes lacs assurant l'alimentation de la rivière en période d'étiage (Lac des Bouillouses). Le régime torrentiel est atténué par la présence de paliers (« plas »), qui correspondent à des niveaux d'érosion caractéristique de la Cerdagne ;
- dans la moyenne vallée, de Mont-Louis à Vinça, la Têt coule dans un lit profondément encaissé dans des gorges, et elle reçoit de nombreux affluents : la Carança, le Mantet, le Routja, le Cady, le Taurinya et la Lentilla en rive droite, et le ruisseau de Cabrils, le Nohèdes et la Castellane en rive gauche ;
- à la sortie des gorges de Vinça, la Têt entre dans sa basse vallée constituée par les formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon.

Dans les haute et moyenne vallées, de nombreux canaux d'irrigation gravitaire détournent une partie de l'eau de la Têt et de ses affluents pour l'arrosage des cultures. Une partie des eaux de surface sert aussi pour l'énergie hydroélectrique : la Têt et ses affluents la Ribérole, la Carança, et la Rotja alimentent en cascade les usines de Fontpédrouse, Thuès, Olette, Sahorre et Fuilla (Guitard, 1998).

Comme toutes les rivières des Pyrénées Orientales, la Têt présente un régime hydrologique très irrégulier. Les débits moyens annuels montrent de fortes variations (Illustration 3).

Deux périodes d'étiage s'observent : la plus marquée est celle de l'été (août et septembre), celle de l'hiver est surtout sensible en amont de Vinça, dans la partie en altitude du bassin versant, où les précipitations hivernales sont stockées sous forme de neige. A Perpignan, des débits d'étiage inférieurs à 300 l/s ont déjà été enregistrés. Avec la proximité de la Méditerranée, l'orographie de la région, les pentes fortes, et le régime pluviométrique méditerranéen (pluies intenses sur de courtes durées), les crues peuvent être très violentes et parfois catastrophiques (les « aiguats »). A Perpignan, le débit des crues décennales est de l'ordre de 500 m^3/s, et une pointe a été estimée à 3000 m^3/s lors de la crue historique d'octobre 1940. Les grands bassins versants d'altitude des affluents de la Têt (rivière de Carança, de Mantet, Rotja, Cady, Llech,…) peuvent entraîner une montée des eaux très rapide dans les gorges. De plus, des

quantités très importantes de matériaux sont charriées par la rivière lors des crues, ce qui les rend d'autant plus dangereuses. Les crues d'automne sont plus importantes que celles du printemps.

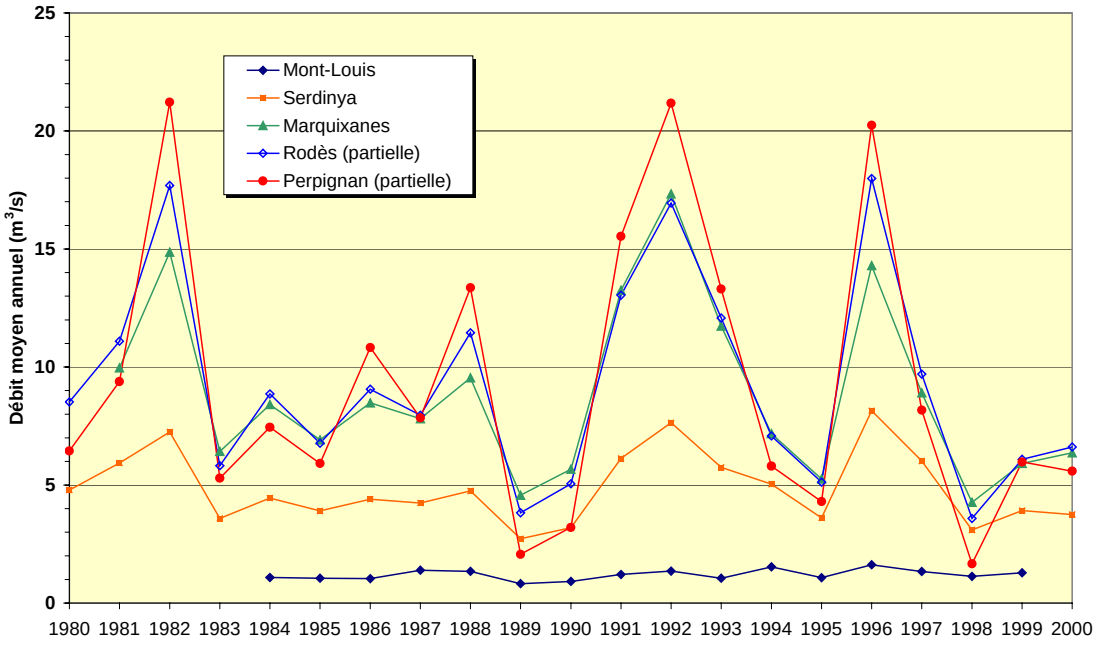


Illustration 3 - Débit moyen annuel de la Têt à différentes stations de jaugeage

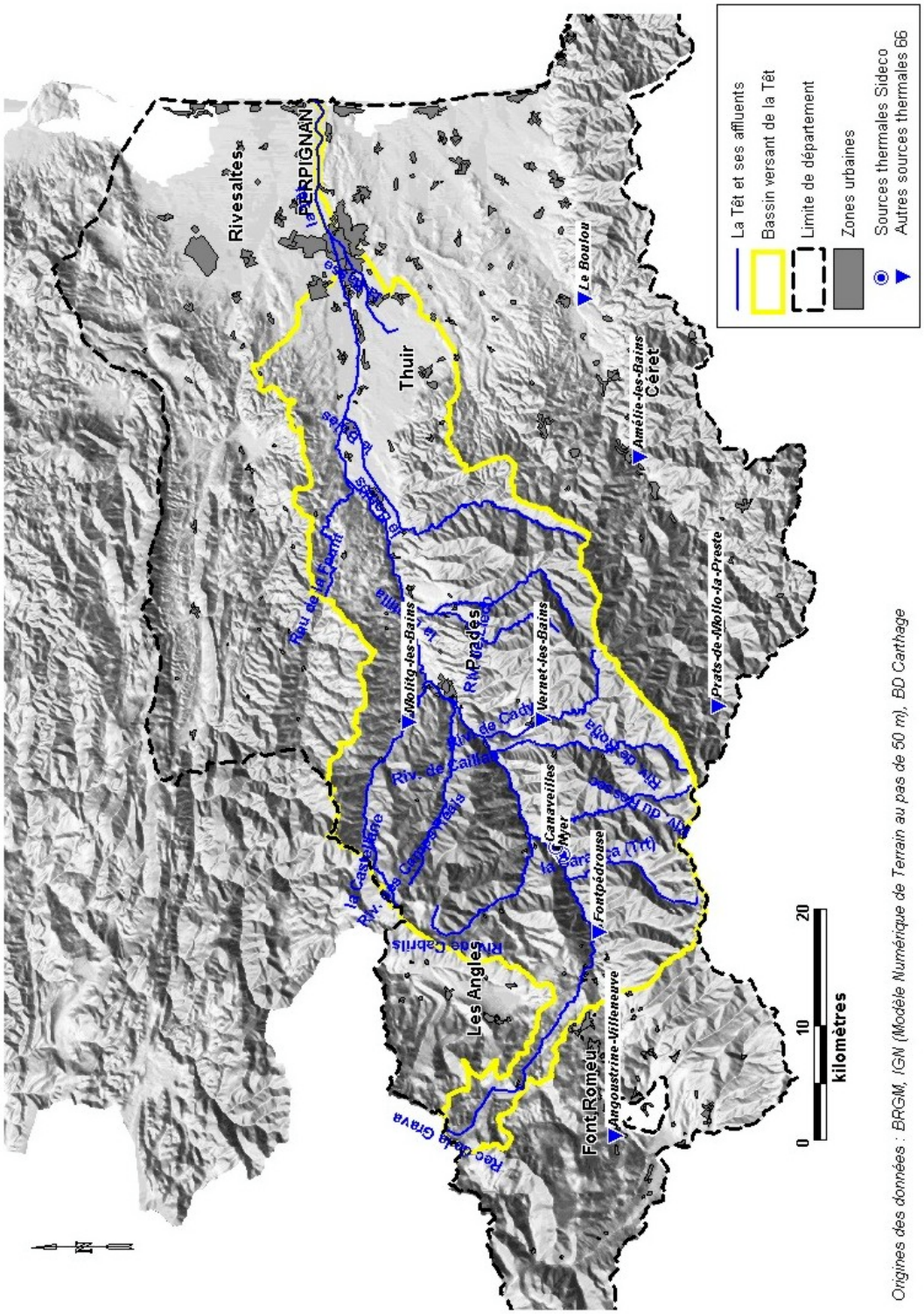


Illustration 4 - Localisation du bassin versant de la Têt, et des principales sources thermales

2.2. PRÉSENTATION DES COMMUNES ET DES SOURCES THERMALES

Le département des Pyrénées Orientales est riche de sources thermales (Illustration 4), dont certaines sont (ou ont été) exploitées pour différents usages (thermalisme, remise en forme, énergie thermique), et dont un aperçu des principales est donné ci-dessous (Illustration 5).

Commune	Nom de la source	Indice BSS[3]	Type de captage	Altitude (m)	Usage	Débit (m^3/h)	T (°C)
Amélie-les-Bains	Petit Escaldadou	11002X0022	Source aménagée	262	Thermalisme	6,8	62,8
Angoustrine-Villeneuve	Colomer	10946X0003	Source aménagée	1388	Remise en forme	31,8	41,1
Le Boulou	Janette	10968X0052	Forage	104	Embouteillage & thermalisme	1,5	16,7
Fontpédrouse	Grande Source	10955X0018	Forage	1159	Remise en forme	30,0	46,5
Molitg-les-Bains	Paracols 1	10953X0058	Forage	486	Thermalisme	7,2	37,4
Prats-de-Mollo-la-Preste	Apollon 1	10993X0001	Source aménagée	1107	Thermalisme	16,3	42,4
Vernet-les-Bains	Dr Defouilloy	10957X0025	Forage	668	Thermalisme	12,0	55,8
Canaveilles	Groupe Amont	10956X0012	Source aménagée	700	Non exploitée	4,0	56
Nyer	Escalada	10956X0014	Source aménagée	760	Chauffage	6,0	61,3
Nyer	Beauté	10956X0016	Source aménagée	736	Non exploitée	2,0	66
Nyer	Cascade	10955X0025	Source aménagée	780	Chauffage	6,5	
Nyer	Saint-André (Groupe)	10956X0015	Source aménagée	739	Remise en forme & chauffage	19,5	73,2

Illustration 5 – Principales sources thermales des Pyrénées Orientales (d'après les Annales des Mines 1998[4])

Avec près de 75°C, les sources du groupe Saint-André, à Thuès-les-Bains, affichent les températures les plus élevées.

[3] Banque de données du Sous-Sol, gérée par le BRGM.

[4] Les cases grisées indiquent les modifications apportées aux données des annales des Mines 1998 suite aux investigations de terrain menées pour cette étude.

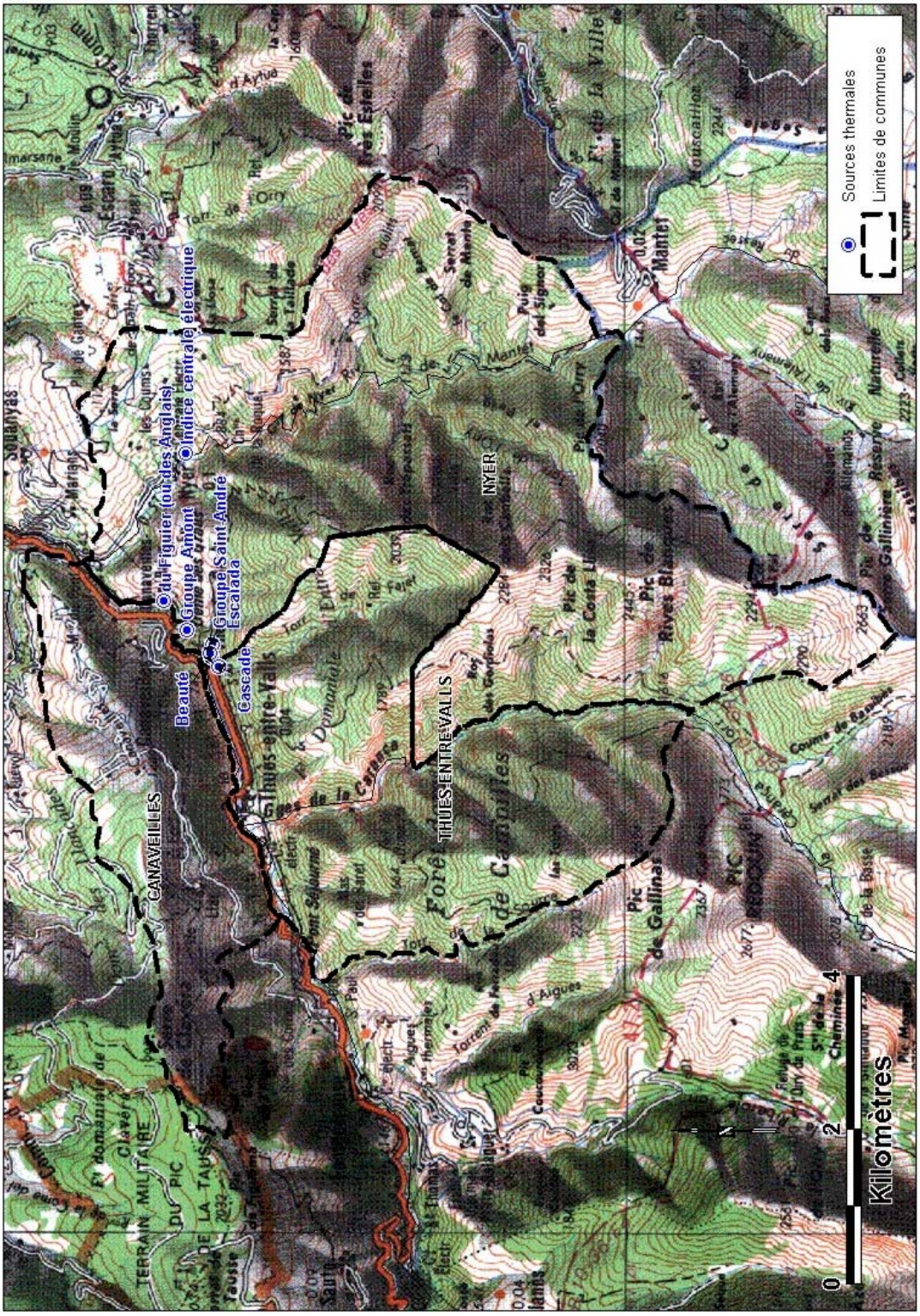


Illustration 6 - Localisation des sources thermales sur Thuès-entre-Valls, Canaveilles et Nyer

Une présentation rapide des communes et des sources thermales connues sur leurs territoires est proposée ci-dessous. Elle est la synthèse de recueil de données, d'investigations de terrain, ainsi que de renseignements obtenus par téléphone auprès des mairies.

2.2.1. Commune de Thuès-entre-Valls

a) Présentation générale

La commune de Thuès-entre-Valls est située à 810 m d'altitude environ, et compte 43 habitants en 2004 pour une superficie de 2041 ha (Illustration 8). Il n'y a pas d'activités artisanales ni agricoles implantées sur la commune. Une centrale électrique, alimentée par une conduite forcée, est à noter. La commune dispose d'une station d'épuration, située près du pont. Son alimentation en eau potable est assurée par deux sources : source du Pont (10955X0031/S), et source de Font del Coucout ou mouillère d'al Coucout (10955X0005/COUCOU). Elle dispose de deux réservoirs de 75 m^3.

La commune de Thuès-entre-Valls dispose de terrains (3 ha environ) dans la plaine alluviale en rive droite de la Têt, qui, d'après la mairie, ne seraient pas inondables (non inondés pendant les crues de 1940 et 1993). On y accède facilement par un large chemin qui débouche sur la RN116 (Illustration 7). Ce terrain est plat et arboré, avec la présence d'une cabane adossée à un imposant olistolithe granitique.

b) Sources thermales

La source thermale dite des « aigues calentes » ou « basses calentes » est située sur le territoire de la commune. Elle sort dans un bassin aménagé pour des bains sauvages. On y accède après 500 m de marche environ sur un petit chemin qui démarre près de la grotte oratoire, et traverse la voie ferrée du Train Jaune. Lors de la visite de terrain du 7 janvier 2004, la température de la source était de 43°C.

Des suintements d'eau sont visibles le long des falaises en bordure de la RN116, entre Thuès-entre-Valls et Thuès-les-Bains. M. le maire de Thuès nous a indiqué que sur certaines portions, ces eaux ne gèlent pas en hiver, ce qui pourrait être l'indice d'une origine thermale au moins partielle.

Illustration 7 – Terrains communaux de Thuès-entre-Valls en rive droite de la Têt

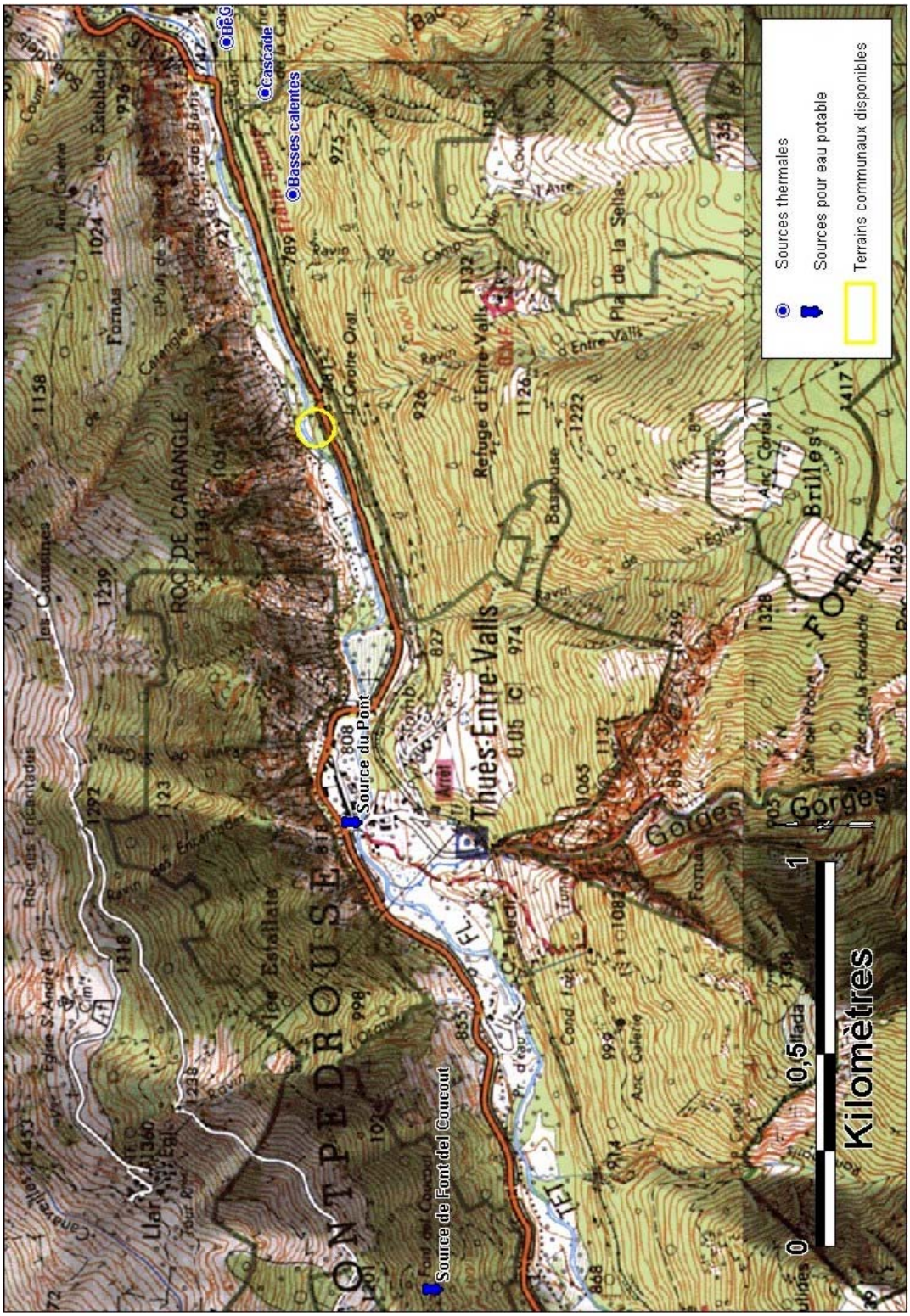


Illustration 8 – Présentation de la commune de Thuès-lentre-Valls

2.2.2. Commune de Canaveilles-Llar

a) Présentation générale

La commune de Canaveilles est située à 932 m d'altitude environ, et comptait 54 habitants en 1999 pour une superficie de 1095 ha (Illustration 12). Il n'y a pas d'activités artisanales recensées sur la commune. Un agriculteur producteur de petits fruits est à noter. Une station d'épuration est implantée sur le hameau de Llar, et une autre sur le hameau de Canaveilles, mais dont le fonctionnement serait médiocre. Une étude est en cours pour la remplacer. L'alimentation en eau potable de Canaveilles et de Llar est assurée par le captage de deux sources (« ravins ») : source de Canaveilles (10956X0001/CANAVE), et source de la Plane (10956X0021/PLANE). Chaque hameau dispose d'un réservoir de 40 m^3.

La commune dispose de terrains en rive gauche de la Têt (parcelles cadastrales 606, 607, 608 et 612) très probablement inondables par fortes crues (le cours d'eau étant relativement encaissé à la sortie du défilé des Graus). On peut y accéder par un chemin étroit dont le départ est situé le long de la RN116, en face de la route D28 qui monte à Canaveilles.

b) Sources thermales

Les sources thermales de Canaveilles s'égrènent en chapelet dans le défilé très encaissé dit des Graus (Illustration 9). Elles émergent pour la plupart en rive gauche de la Têt et au niveau de la rivière (certaines sortiraient même directement dans le lit du fleuve, de mémoire des habitués des lieux). Lors de la visite de terrain effectuée en janvier 2004, 6 sources principales ont pu être repérées, dont les températures s'échelonnaient de 64°C pour la plus chaude et la plus amont (qui semble correspondre à la source dite « des bains » de l'ancien établissement thermal de Canaveilles-les-Bains[5]), à 27°C pour la moins chaude. Les eaux chaudes sont marquées par des filaments de glairine ou barégine[6], dépôts organiques blanchâtres et filamenteux caractéristiques des eaux sulfureuses des Pyrénées (Illustration 10).

Ces eaux thermales de Canaveilles étaient connues depuis longtemps, et furent utilisées par les moines d'Escalada qui construisirent un monastère en rive gauche de la Têt, dans le défilé des Graus. A la suite d'une forte inondation à la fin du 9ème siècle, ce monastère fut détruit et reconstruit à Saint-Michel-de-Cuxa. Sur l'emplacement de l'ancien monastère, des bains troglodytiques furent construits au 16ème siècle. D'abord

---

[5] D'après les pièces présentes dans le dossier de « demande d'autorisation d'exploiter à distance du point d'émergence », envoyé à la préfecture des Pyrénées Orientales par M. Marcel Pancera, alors directeur propriétaire de l'établissement thermal des Graus de Canaveilles les Bains, le 20 octobre 1957.

[6] La barégine est une substance mucilgineuse qui se développe naturellement dans les eaux des sources thermales de Barèges (Hautes Pyrénées). Elle est formée par des bactéries qui oxydent les composés soufrés, phénomène qui constitue pour elles la source d'énergie. Ces bactéries excrètent un gel qui semble présenter des activités antibiotiques, anti-inflammatoires et cicatrisantes. (*D'après http://www.bareges.com/l_eau/les_bienfaits.htm*).

envisagé à Olette jusqu'où les eaux chaudes auraient été acheminées, l'établissement thermal de Canaveilles-les-Bains est finalement construit sur place, et à la fin du 19ème siècle, il exploitait une douzaine de sources pour l'embouteillage (sous l'appellation « eaux de la fontaine de l'Infante Inès ») et le thermalisme. L'AMA (Arrêté Ministériel d'Autorisation) des sources de Canaveilles (« Groupe Amont ») date du 25/05/1868.

L'établissement thermal fut ensuite repris et réaménagé sous forme d'hôtel haut de gamme avec piscine. Ce « relais de l'Infante » a brûlé en 1984, et la route d'accès, maintenant partiellement effondrée, est condamnée (Illustration 11).

Illustration 9 – Défilé des Graus de Canaveilles et sources thermales en rive gauche de la Têt

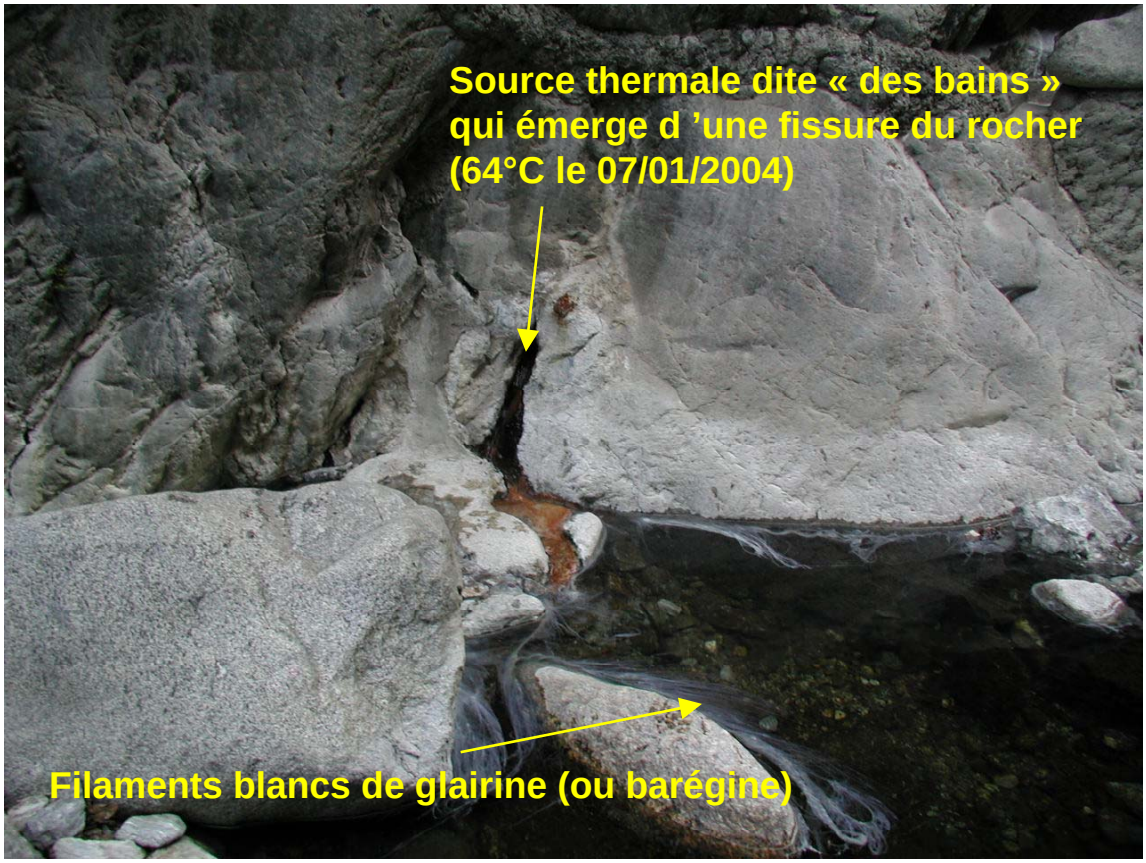


Illustration 10 – Source thermale dite "des bains" de Canaveilles

Illustration 11 – Accès à l'ancien "relais de l'Infante"

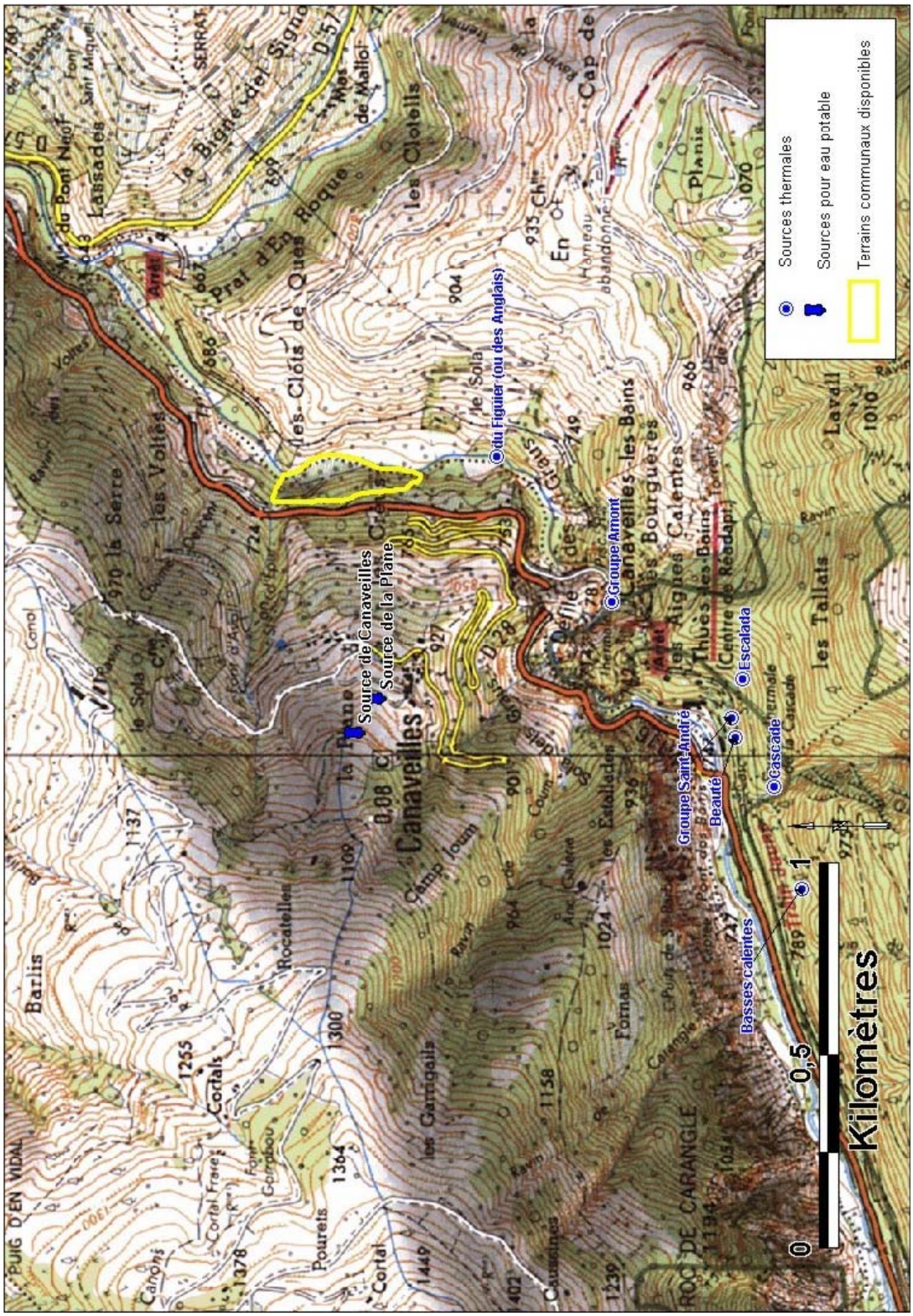


Illustration 12 – Présentation de la commune de Canaveilles

2.2.3. Commune de Nyer-En

a) Présentation générale

La commune de Nyer-En est située à 734 m d'altitude environ, et comptait 108 habitants en 1999 pour une superficie de 3700 ha. Il n'y a pas d'activités artisanales recensées sur la commune. Trois gîtes communaux, et un éleveur de bovins sont à noter.

L'alimentation en eau potable est assurée par trois sources : la source du château ou font de Fourgui (10956X0004/FOURGU), la source de la Fount de la Truja ou source du camping (10956X0006/FTRUJA), et la source du ravin de Tartagou ou source de Riquière (10956X0005/TARTAG). La commune dispose d'un réservoir, et d'une station d'épuration.

Une usine hydroélectrique privée est installée en amont du village, en rive droite de la rivière de Mantet.

b) Sources thermales

Le **CTRRF** (Centre Thermal de Rééducation et de Réadaptation Fonctionnelle) de **Thuès-les-Bains** exploite des sources thermales situées sur la commune de Nyer, à l'entrée du défilé des Graus de Canaveilles, et dont l'Arrêté Ministériel d'Autorisation date du 15 avril 1852. Ce centre est équipé de 57 chambres, et peut accueillir 80 patients en rééducation.

Trois groupes de sources sont utilisés actuellement :

1. Groupe Escalada : cette source est utilisée en circuit primaire dans un échangeur thermique pour la production d'eau chaude sanitaire (seule l'énergie thermique est utilisée) en complément du groupe Cascade. Les mesures in situ au griffon en janvier 2004 indiquent une température de 58°C. Le débit annoncé est de 72 m^3/j.

2. Groupe Cascade : cette source émerge en rive droite du torrent de la Fagette (dont une partie est captée pour assurer entièrement l'approvisionnement en eau douce du centre thermal : eau de boisson, eau sanitaire et eau de chauffage). Les mesures in situ au griffon en janvier 2004 indiquent une température de 75°C. Cette source est utilisée en circuit primaire dans un échangeur thermique (seule l'énergie thermique est utilisée) :

   - pour la production d'eau chaude sanitaire en complément du groupe Escalada ;

   - pour le chauffage, en complément du groupe Saint-André.

3. Groupe Saint-André : cette source est située sur la gauche en contrebas de l'entrée du centre thermal. Les mesures in situ au griffon en janvier 2004 indiquent une température de 65°C. Le débit annoncé est de 400 m^3/j. Elle est utilisée :

- en circuit primaire dans un échangeur thermique pour la production d'eau chaude pour le chauffage (seule l'énergie est utilisée), en complément du groupe Cascade ;

- directement dans les piscines (ces piscines ne sont pas ouvertes au public, mais accessibles uniquement sur prescription médicale).

Les sources Beauté (65°C, 8 m^3/j), et Saint-Louis (44°C, 8 m^3/j), situées dans l'enceinte du CTRRF, ne sont plus exploitées actuellement.

La part des sources non captée, ainsi que les eaux du centre après utilisation, se jettent dans la Têt à hauteur du CTRRF.

La commune de Nyer dispose également d'une source thermale dite « **du figuier** » (ou « des Anglais »), située en rive droite de la Têt, à la sortie du défilé des Graus de Canaveilles, et qui n'est pas exploitée actuellement. Cette source émerge naturellement au niveau de la rivière, et des galets ont été disposés pour ménager une baignoire naturelle, et obtenir un mélange des eaux thermales et de la rivière qui soit propice aux bains ! Lors des investigations de terrain de janvier 2004, la température à l'émergence était de 54°C. Le débit est estimé à 1 l/s, soit 86 m^3/j (Lenoble, 2000).

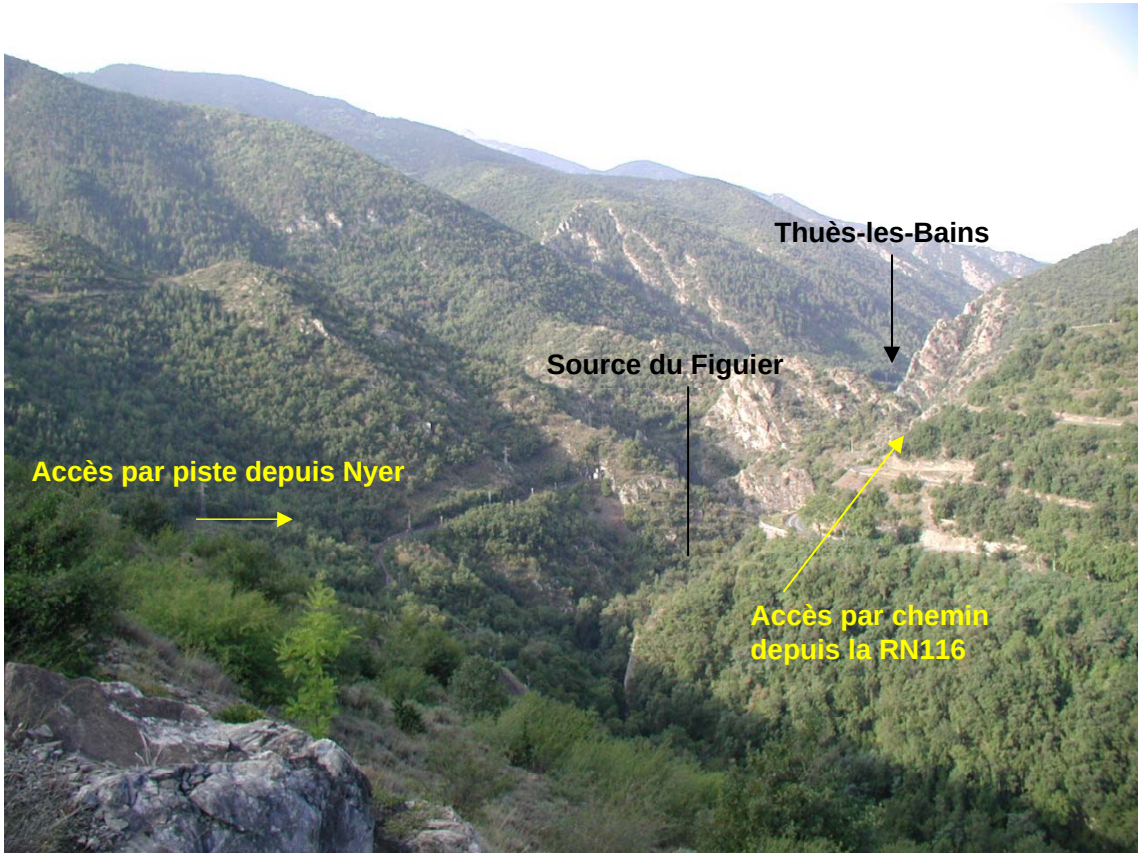


Illustration 13 – Accès à la source du Figuier

Illustration 14 – Emergence de la source du Figuier, en rive drite de la Têt

Illustration 15 – Situation de la source du Figuier

L'accès à cette source, relativement difficile, peut se faire de deux façons :

- par la piste au départ de Nyer, mais celle-ci s'arrête au niveau du tunnel de chemin de fer, et il faut poursuivre à pied par un chemin ;

- à pied par un chemin qui débouche sur la RN116, en face de la route D28 qui monte à Canaveilles.

La mairie a la possibilité d'acquérir des terrains à proximité de la source du Figuier, en rive droite de la Têt, situés sur d'anciennes terrasses agricoles qui étaient jadis alimentées par un petit canal d'irrigation (Illustration 16).

Enfin, sur le site même du village de Nyer, des sources d'eaux chaudes étaient connues qui servaient au lavoir du village. Elles ont été condamnées lors de la construction de la centrale électrique en rive droite du ruisseau de Mantet. Une mince sortie d'eau chaude est visible dans un des angles de la centrale, lors de la visite de terrain de septembre 2003, la température était de 20°C, et la conductivité de 300 µS/cm (contre 11°C et 168 µS/cm pour le ruisseau de Mantet).

La mairie possède des terrains juste en amont de la centrale, qui dominent le village.

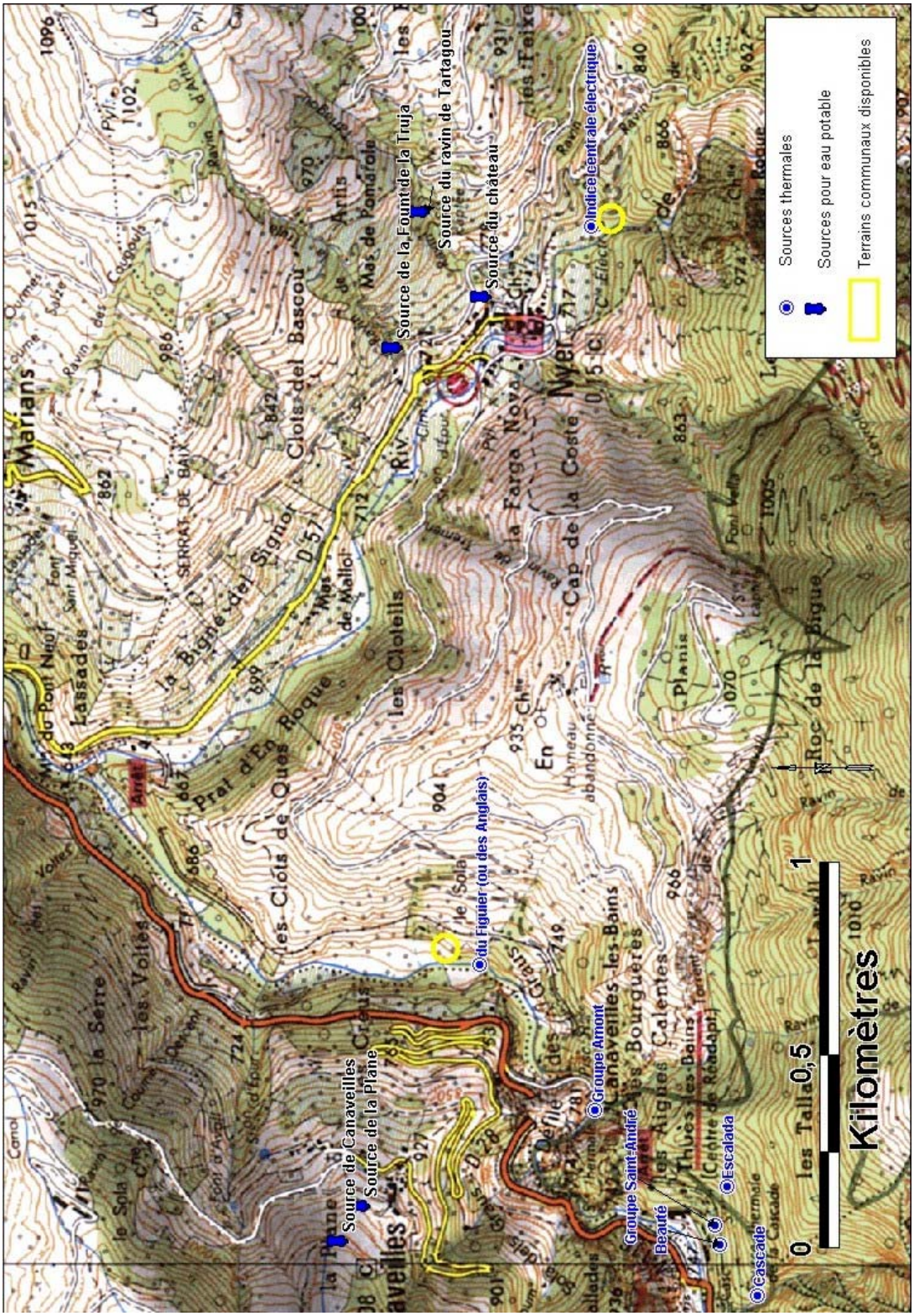


Illustration 16 – Présentation de la commune de Nyer

3. Contexte géologique des sources

Cette partie est consacrée à la définition du contexte géologique des sources thermales. Après une présentation du contexte général à l'échelle des Pyrénées, le contexte géologique des sources est détaillé.

Elle se propose de répondre aux questions suivantes, qui ont trait aux roches, aux eaux qu'elles contiennent, et à leur caractère thermominéral :

1. Quelle est la roche hôte des sources ?

2. Quelle est leur histoire hercynienne (300 Ma) et pyrénéenne (40 Ma) ?

3. Quelle est la structuration de cette roche hôte ?

4. Eaux chaudes : quelle en est l'origine ? quelles sont les potentialités de circulations profondes ? existe-t-il un réservoir profond ?

3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Cette partie est consacrée à une histoire géologique simplifiée des Pyrénées. Le lecteur pourra trouver une description plus détaillée en annexe (Annexe 1).

3.1.1. Structure géologique actuelle des Pyrénées

Du sud au nord, les Pyrénées sont subdivisées en trois unités structurales : la Zone Sud-Pyrénéenne (ZSP), La Haute-Chaîne Primaire Axiale, et la Zone Nord-Pyrénéenne (ZNP).

- la Haute Chaîne Primaire forme l'ossature des actuelles Pyrénées-Orientales. A l'affleurement apparaissent le socle anté-paléozoïque et paléozoïque (I), et des reliques de sa couverture mésozoïque (II). La Haute Chaîne Primaire est séparée de la Zone Nord Pyrénéenne par la Faille Nord Pyrénéenne, au nord du massif granitique de Quérigut-Millas ;

- la Zone Nord Pyrénéenne (Pyrénées Septentrionales) est complexe, et associe des terrains anciens comparables à ceux de la Chaîne Primaire, et des terrains mésozoïques plissés (II) ;

- la Zone Sud-Pyrénéenne (Pyrénées Méridionales), du versant sud de la Haute Chaîne Primaire jusqu'au bassin de l'Ebre, est constituée de terrains sédimentaires plissés, mésozoïques (II) et cénozoïques (III).

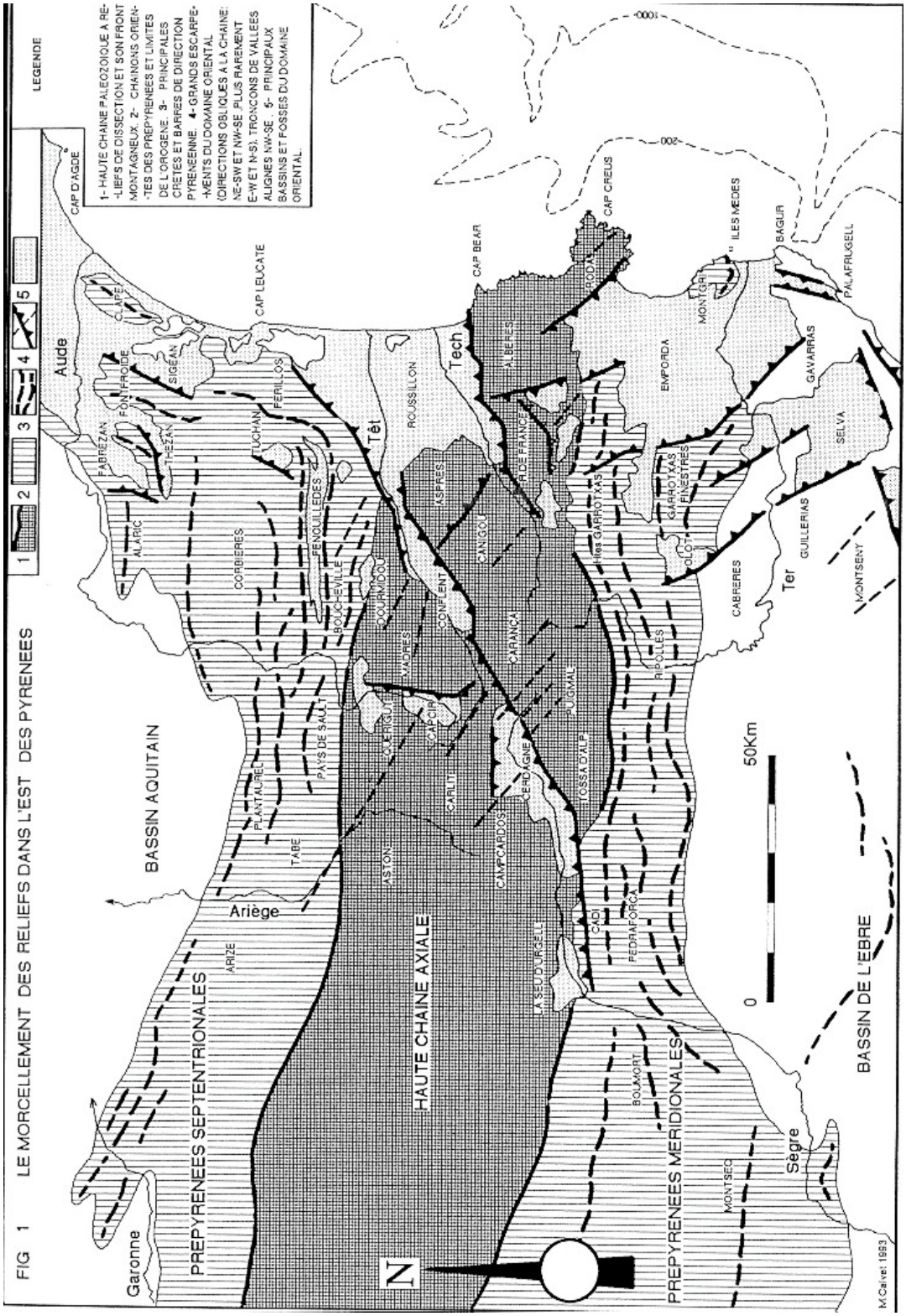


Illustration 17 – Morcellement des reliefs dans l'est des Pyrénées (Calvet, 1996)

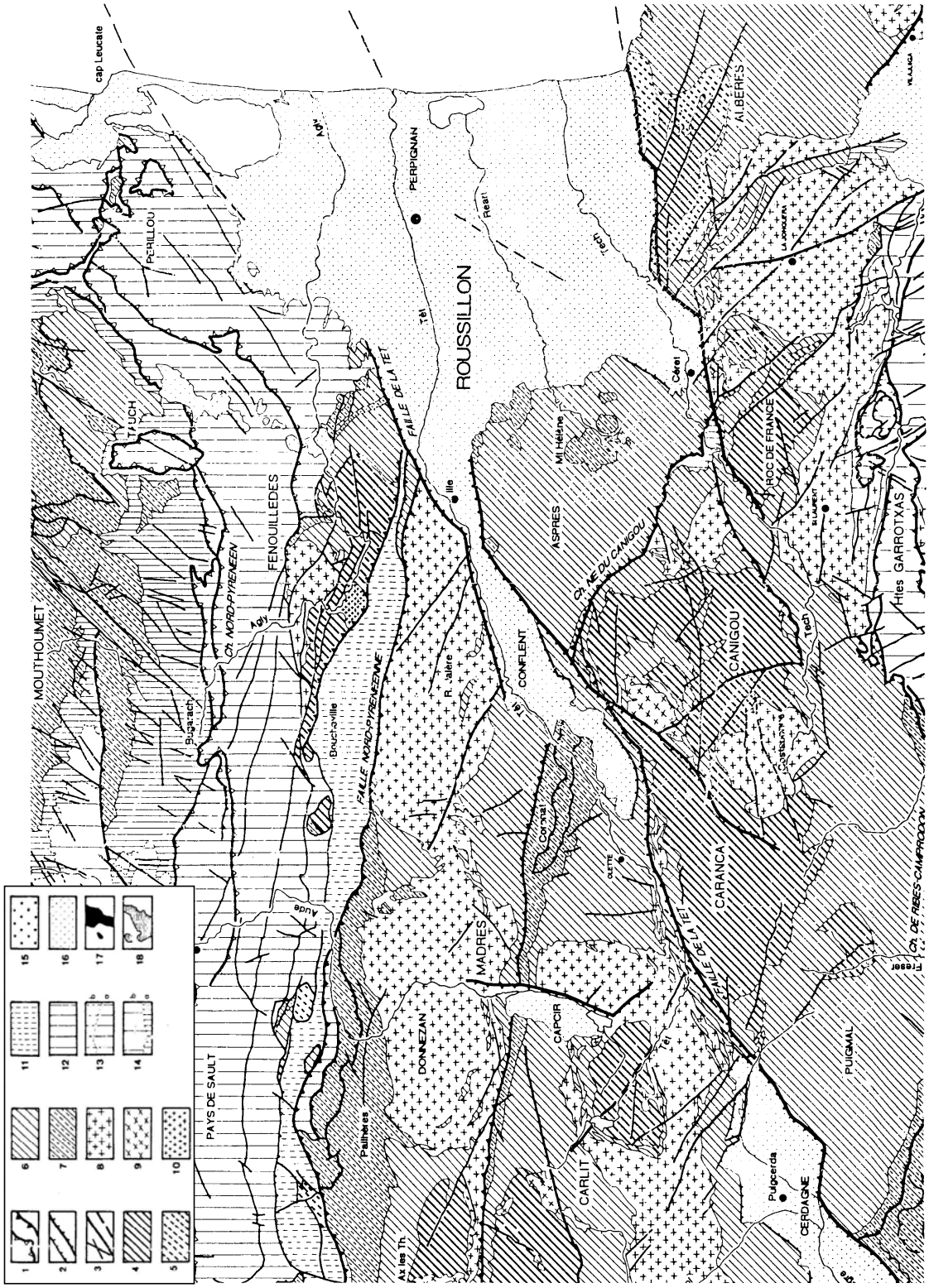


Illustration 18 – Carte géologique schématique (Calvet, 1996)

	N°	Légende
Tectonique	1	Chevauchements pyrénéens dans la couverture sédimentaire Chevauchements et failles inverses dans le socle (hercyniens ou pyrénéens)
	2	Faille normale néogène
	3	Autres failles ; failles probables ou masquées
Socle hercynien	4	Ortho- et paragneiss précambriens
	5	Migmatites dans le socle précambrien et la base du Paléozoïque
	6	Paléozoïque inférieur (Cambro-ordovicien)
	7	Paléozoïque moyen et supérieur (Caradoc, Silurien, Dévonien, Carbonifère)
	8	Granitoïdes en massifs supérieurs
	9	Granites intermédiaires
	10	Granites profonds catazonaux
Couverture plissée	11	Mésozoïque métamorphique nord-pyrénéen
	12	Série nord-pyrénéenne et zone des flyschs (Mésozoïque carbonaté et marneux puissant et peu lacunaire)
	13	Série mésozoïque décollée ou charriée sud-pyrénéenne, surmontée de Paléogène (b)
	14	Séries sous-pyrénéennes et couverture sud de la zone axiale base mésozoïque très lacunaire (Trias, Crétacé sup.,…) Séquence éocène marine (b) base continentale
	15	Conglomérats syntectoniques et molasses continentales paléogènes des bassins flexuraux bordiers
	16	Remblaiement détritique des fossés orientaux (Oligocène, Miocène, Pliocène) et molasses néogènes de l'Aquitaine
Volcanisme	17	Volcanisme basaltique et trachytique du Néogène (11 à 2 Ma)
	18	Volcanisme basaltique quaternaire de la Garroixa (0,4 à 0,02 Ma)

Illustration 19 – Légende de l'Illustration 18 (Calvet, 1996)

Schématiquement, le bassin de la Têt se répartit sur deux grands domaines géologiques distincts :

- le domaine de socle, constitué essentiellement de roches magmatiques et métamorphiques (granites, gneiss, orthogneiss, paragneiss, schistes et micaschistes), et de terrains de la couverture sédimentaire du Paléozoïque (I) et du Mésozoïque (II), que la Têt traverse de sa source à Vinça ;

- le domaine plio-quaternaire du bassin du Roussillon de Vinça à la Méditerranée, qui est séparé des Pyrénées au sud par le faisceau des failles de Albères, et des Corbières au nord par le faisceau des failles de Prades (ou failles de la Têt).

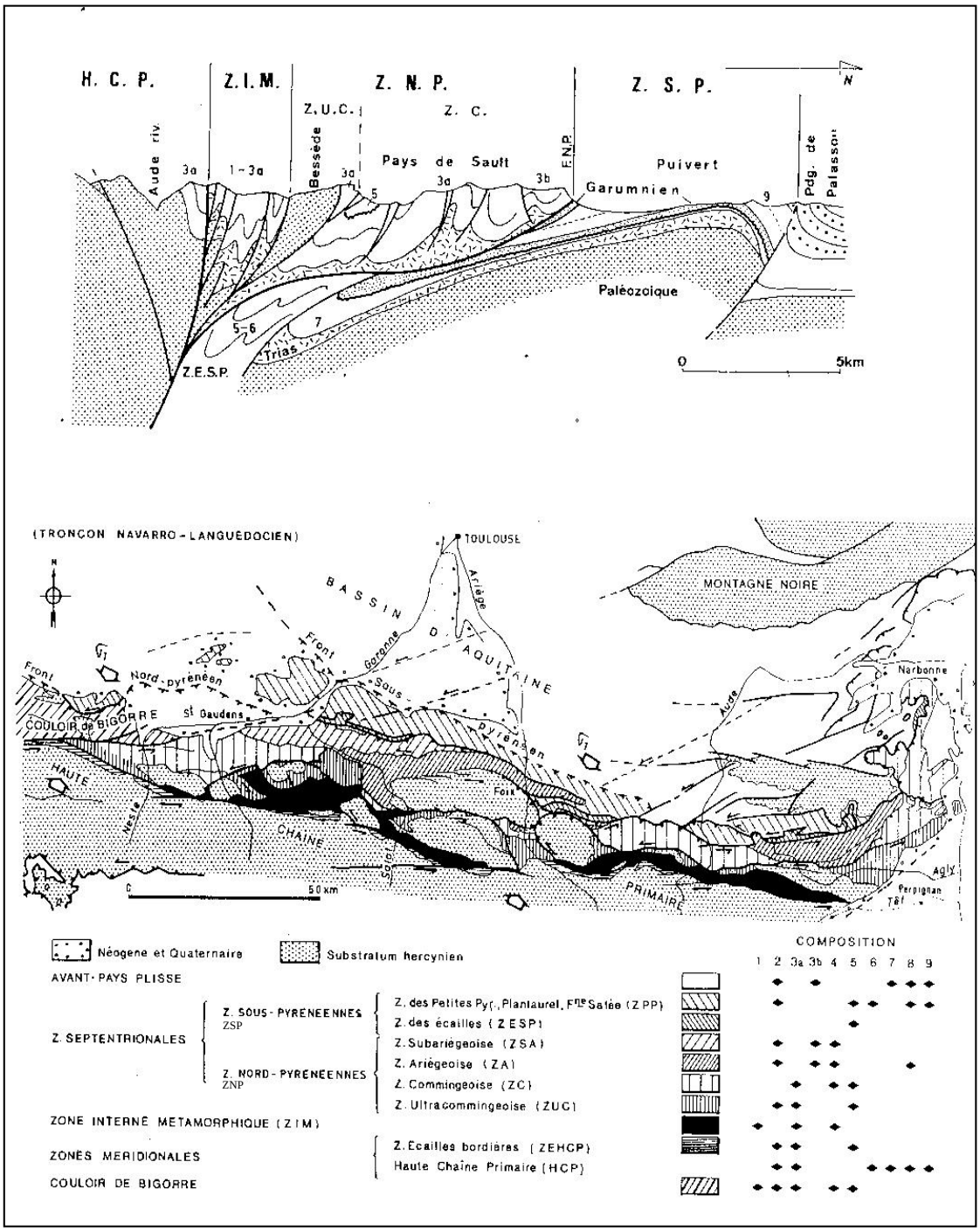


Illustration 20 – Carte géologique et coupe structurale générale (Souquet et al., 1976&1977)

3.1.2. De l'orogenèse hercynienne à l'orogenèse pyrénéenne

L'ensemble des terrains du Paléozoïque (I) est évalué à une dizaine de kilomètres d'épaisseur dans les Pyrénées-Orientales. Ils reposent sur un substratum précambrien, composé de terrains de socle (paragneiss, métagranites,…).

Au Cambrien et au Silurien, dans la zone axiale des Pyrénées occupée par la mer, se déposent essentiellement des sédiments argileux (sédimentation en eau profonde), qui en se métamorphisant, formeront des schistes.

A partir du Dévonien, les faciès sont essentiellement calcaires (calcaires et dolomies du synclinal de Villefranche, causse de Thuir), ce qui est signe d'une sédimentation marine en eau moins profonde. Ce changement de condition de sédimentation est dû au début de l'**orogenèse hercynienne** induite par la tectonique des plaques, et qui sera maximale à la fin du Carbonifère. Pendant l'orogenèse, les terrains anciens subissent des déformations (plissements, charriage…) et/ou du métamorphisme (gneiss et orthogneiss du Canigou). Les massifs granitiques sont déformés par les épisodes tectoniques tardifs, notamment par de grandes zones de mylonitisation[7] NO-SE à E-O particulièrement dans le massif des Albères, le Nord du Canigou et les Aspres. Les zones de mylonitisation sont liées à la mise en place de failles.

La **faille inverse de la Têt**, est une faille majeure qui se met en place à la fin du cycle hercynien. C'est un **accident de socle fondamental, d'ampleur régionale**, et qui concerne les terrains sur des profondeurs très importantes (faille intéressant la croûte continentale).

Au Permien, la mer ayant complètement disparu, se produit un phénomène d'intense érosion continentale qui rabote les montagnes hercyniennes, et se poursuit jusqu'au début du secondaire (Permo-Trias).

Au Mésozoïque, jusqu'au début du Crétacé inférieur, se produisent des successions de régimes marins, qui conduiront à des périodes de sédimentation (importants dépôts calcaires dans l'est des Pyrénées, les Corbières, et jusqu'aux Grands Causses).

A la fin du Crétacé inférieur, l'Ibérie et l'Europe se séparent pour donner naissance au Golfe de Gascogne (Illustration 21). Dans les zones de contrainte, de grandes fractures parallèles de direction Est-Ouest se créent, qui délimitent des compartiments dont certains s'affaissent, et sur lesquels vont s'accumuler des séries alternées de niveaux sableux et argileux, épaisses de plusieurs centaines de mètres, voire de kilomètres.

A partir du milieu du Crétacé, poussée par la plaque africaine, la plaque ibérique entre en collision avec la plaque européenne, ce qui entraîne l'**orogenèse pyrénéenne**. Pris en étau, les terrains pyrénéens s'empilent pour donner naissance à des reliefs. Cette phase de plissement pyrénéen connaîtra son apogée à l'Eocène (milieu du tertiaire).

---

[7] Mylonite : roche broyée plus ou moins finement, liée à la mise en place de faille.

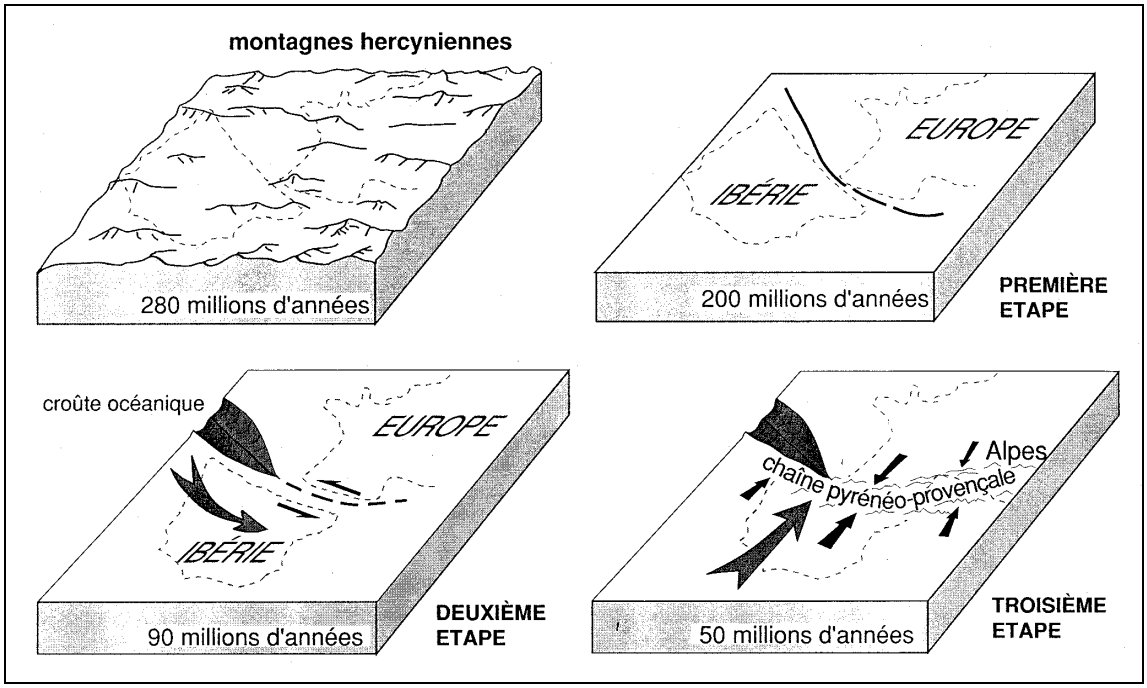


Illustration 21 – Collision de la plaque Ibérie avec la plaque Europe (Bousquet, 1997)

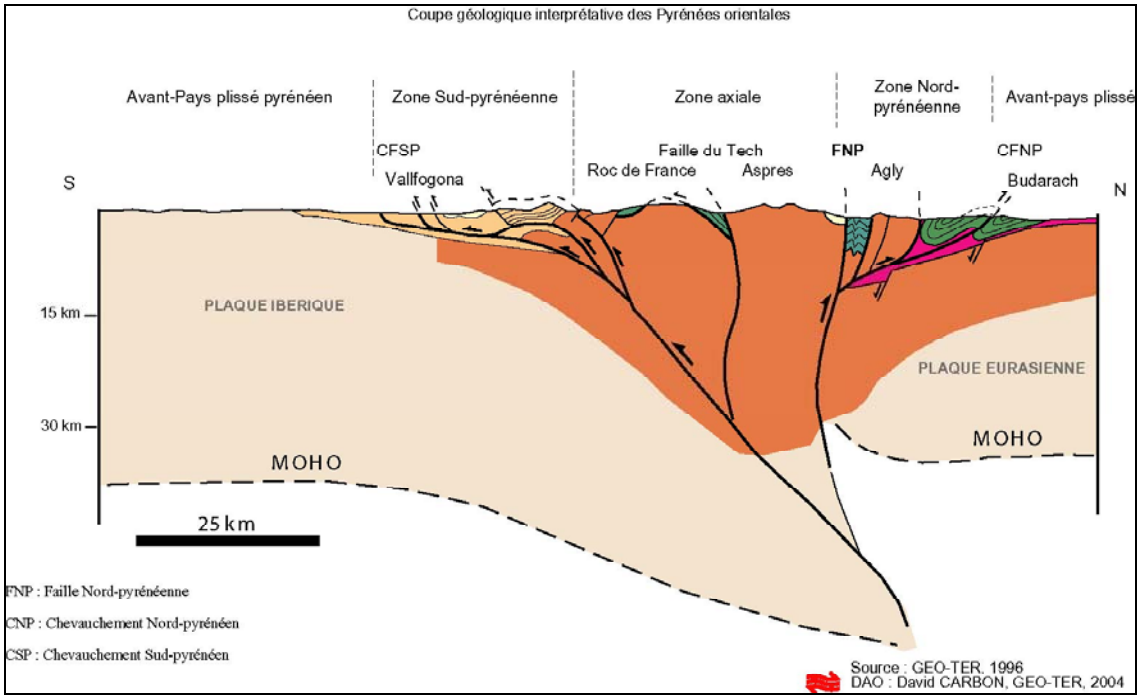


Illustration 22 – Coupe géologique interprétative des Pyrénées orientales (GEO-TER, 1996)

3.1.3. L'histoire miocène (III)

Au Néogène (25-1,8 Ma), l'histoire géologique de la chaîne pyrénéo-provençale se poursuit différemment d'Ouest en Est :

- à l'Ouest, dans les Pyrénées Centrales et Occidentales, les reliefs continuent de monter, et subissent des phénomènes d'érosion ;

- à l'Est, l'histoire est liée à celle de la Méditerranée.

A partir de –30 millions d'années (Oligocène), de grandes failles, de Nîmes et de la Camargue aux Pyrénées Orientales, et dans l'actuel Golfe du Lion, provoquent l'affaissement des reliefs dans la partie Est de la chaîne pyrénéo-provençale. Les fossés se remplissent au fur et à mesure de leur formation par accumulation de séries continentales arrachées par l'érosion (torrents,…). Les effondrements deviennent suffisamment importants pour permettre l'entrée de la Méditerranée, et c'est l'**ouverture du Golfe du Lion** à l'Aquitanien (Miocène inférieur).

Au miocène moyen, la plate-forme marine du Golfe du Lion va s'effondrer, et les massifs bordiers, comme le Canigou, vont connaître une phase de surrection. Cette phase entraînera des contraintes cassantes, conduisant à des **structurations** (failles, fractures, décrochements,…) **verticales de très grande ampleur** (de l'ordre de 2500 m en jeu vertical).

3.1.4. L'histoire plio-quaternaire

Elle concerne essentiellement le bassin du Roussillon, bassin séparé des Pyrénées, au Sud, par le faisceau des failles des Albères Vallespir, des Corbières au Nord, par le faisceau des failles de Prades et à l'Ouest par le massif des Aspres, et enfin largement ouvert à l'Est sur la Méditerranée. Les différents modèles de remplissage de ce bassin seront largement contrôlés par les variations du niveau marin aux différentes époques : modèles de Gilbert Delta au Pliocène (fin III), et terrasses étagées au niveau du Tech, de la Têt, du Réart et de la Canterranne au Pléistocène (IV).

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE LOCAL

L'ensemble des sources hydrothermales d'Olette témoignent de températures qui évoluent entre 50°C et 75°C. Cela signifie que la profondeur minimale atteinte peut être estimée, suivant le degré géothermique moyen de +3°C / 100m et avec une température extérieure estimée à 15°C, aux alentours de 1500 m. Elles sont concentrées suivant le grand accident du Nord du Massif du Canigou (Faille de Prades quand il s'agit du linéament satellitaire et faille de la Têt quand il s'agit de la faille cartographiée) qui sans aucun doute forme le drain « per ascensum » de ces eaux géothermales (Illustration 23).

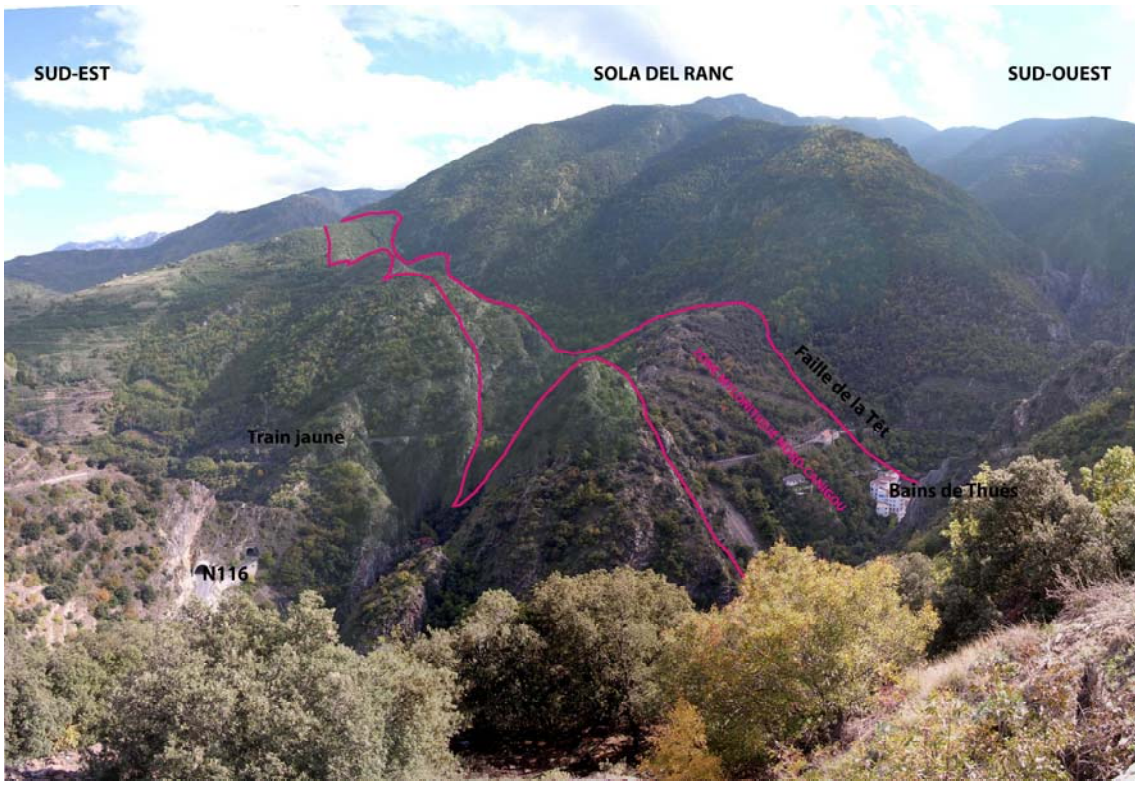


Illustration 23 – Photographie générale des sites

Les données recueillies et les données de la géologie régionale permettent de dessiner le schéma de la **cellule hydrothermale potentielle** (cf. § 1.2.1), en cinq points :

3.2.1. La faille de Prades, un drain pour le mouvement des eaux « per ascensum »

La faille de Prades, linéament satellitaire, est un accident de socle fondamental qui traverse même le Golfe du Lion puisqu'il semble se prolonger par la faille de Nîmes vers l'Est (Illustration 24). Sur le terrain ce linéament se marque en France et en Espagne comme le prolongement des failles normales d'effondrement du bassin néogène de la Cerdagne avec une direction N60°. Ces failles conservent cette direction, côté français, jusqu'à Fontpédrouse et Thuès-les-Bains, passant à N90° à l'Est de cette localité, direction qu'elles conservent jusqu'au Sud d'En. Aux environs de Nyer, elles bifurquent en deux branches principales (Illustration 25) :

- l'une au Sud de direction Est-Ouest forme la limite entre les gneiss de Carança et les formations de Canaveilles ;

- l'autre au Nord, de direction moyenne N60° limite à l'ouest le bassin ferrifère du Conflent.

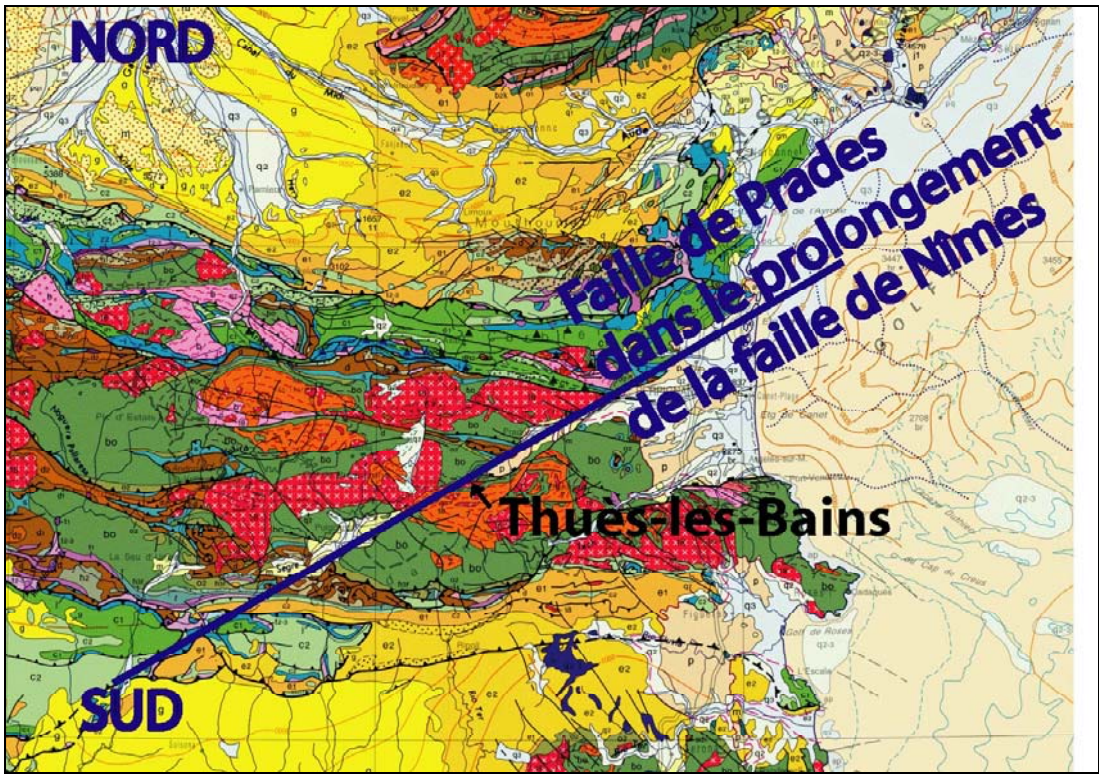


Illustration 24 – La faille de Prades (d'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000 du Brgm, édition 2004)

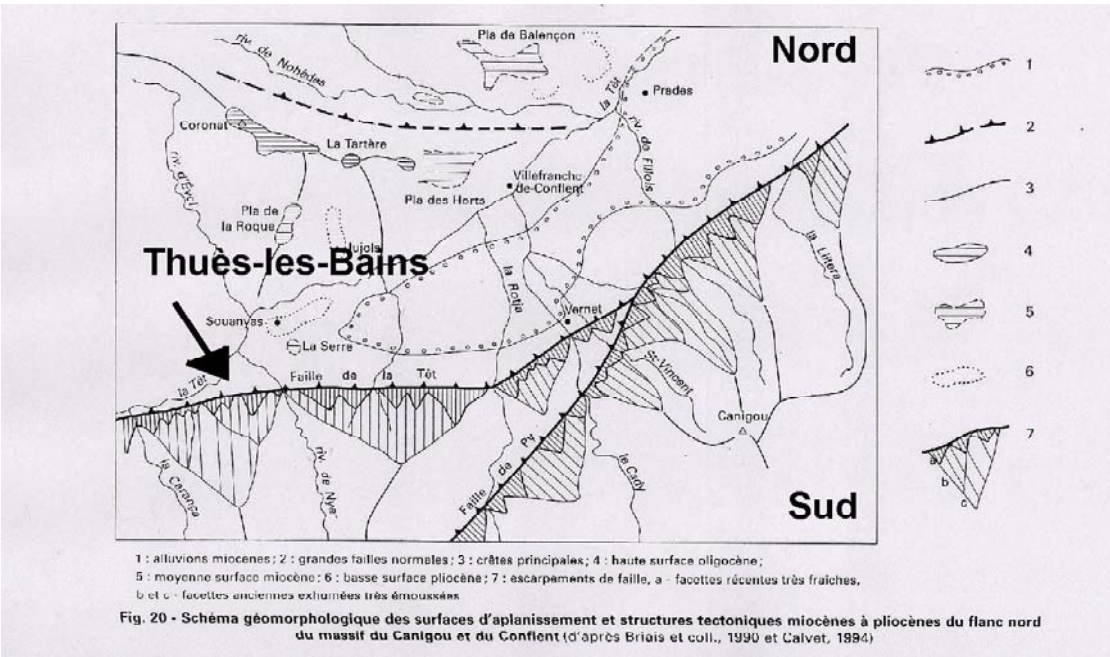


Illustration 25 – Schéma structural des failles de la Têt et de Py (d'après la notice de la carte géologique de Prades)

3.2.2. Une zone d'infiltration : mouvement des eaux « per descensum »

Les orthogneiss du Canigou, liés à l'anticlinal du Canigou, constituent une vaste zone d'infiltration potentielle des eaux de pluies. Globalement pentés vers le nord, ils peuvent conduire un mouvement général des eaux d'infiltration vers les profondeurs, pour rejoindre la faille de la Têt et la zone mylonitique[8] Nord-Canigou, drains de circulation préférentielle qui permettront la remontée rapide des eaux chaudes vers la surface.

La coupe suivante (Illustration 26), extraite de la notice de la carte géologique de Prades (échelle 1/50 000, éditions du Brgm, Guitard *et al.,* 1998), montre la disposition de la faille normale de la Têt par rapport à la zone mylonitique Nord-Canigou (CMNC).

[8] Mylonite : roche broyée plus ou moins finement, associée aux zones tectoniques.

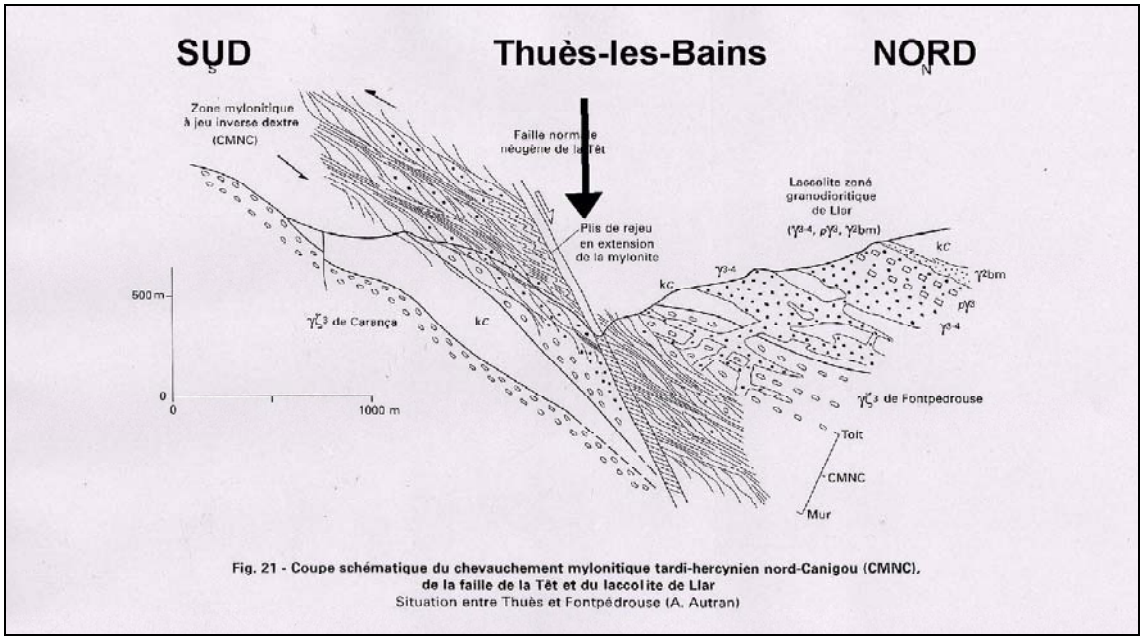


Fig. 21 - Coupe schématique du chevauchement mylonitique tardi-hercynien nord-Canigou (CMNC), de la faille de la Têt et du laccolite de Llar
Situation entre Thuès et Fontpédrouse (A. Autran)

Illustration 26 – Coupe schématique du chevauchement mylonitique Nord-Canigou (d'après la notice de la carte géologique de Prades)

3.2.3. Un massif réservoir : le massif du Canigou

Le Massif du Canigou et sa formidable ceinture métamorphique de terrains paléozoïques imperméables avec un pendage nord assez penté de l'ordre de 50°, constituent un réservoir en profondeur de très grande ampleur (Illustration 27).

Les séries du Canigou sont essentiellement siliceuses mais elles contiennent de nombreuses bandes carbonatées qui forment d'excellents réservoirs. Ces séries ont d'abord subi plusieurs plissements et métamorphismes. Elles sont donc particulièrement structurées (essentiellement plissées et fracturées), foliées (plans de cristallisations préférentiels des minéraux de métamorphisme) et schistosées (plans de débits préférentiels métamorphiques), ce qui favorise la perméabilité et la porosité.

3.2.4. La structuration du massif réservoir

Parmi les structurations il en est une, la plus récente, qui voit se développer des objets structuraux d'une ampleur de l'ordre de 2500 m en jeu vertical (Clauzon 2001, Maurel et al. 2002, Duvail, 2004 (sous presse)). Il s'agit, pour l'ensemble du domaine du Golfe du Lion, de l'effondrement de la plate-forme marine miocène du Golfe du Lion et de la surrection de tous les massifs bordiers dont le Canigou, lors de l'événement post miocène moyen, et pré messinien aux environs de 7 Ma.

Les objets structuraux ménagés lors de cette phase vont permettre potentiellement la sortie des eaux géothermales engrangées par le Massif du Canigou. Mais une condition manque encore au schéma, c'est la mise en ouverture de ces éléments structuraux essentiellement verticaux et de grande ampleur, pour que les eaux puissent circuler. C'est ce qui va être abordé ci-dessous (cf. § 3.2.5).

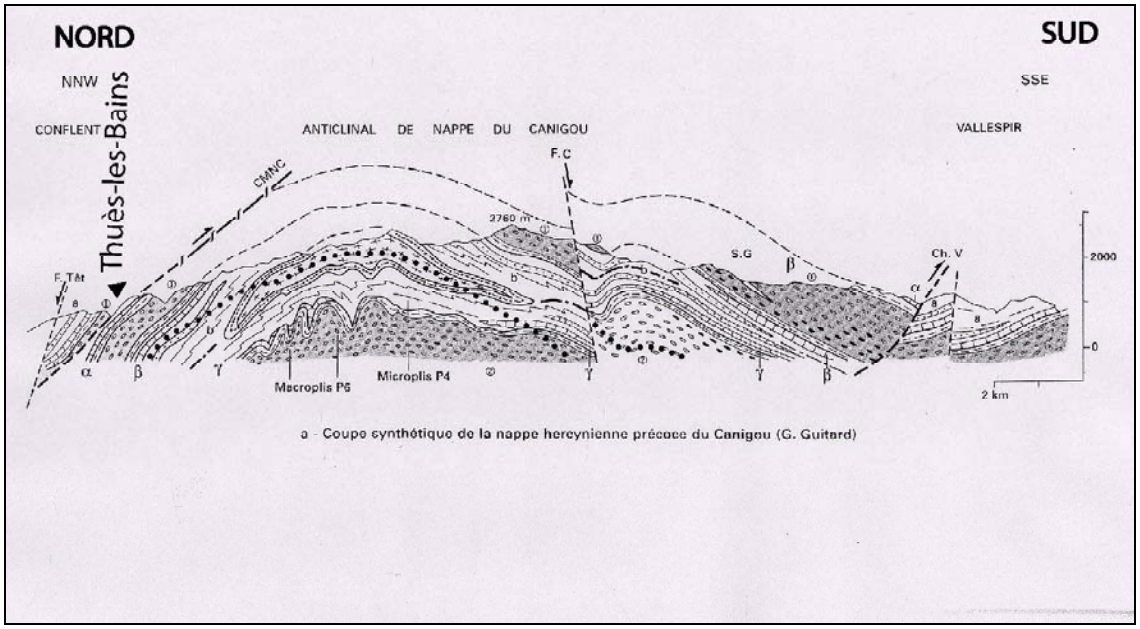


Illustration 27 – Un massif réservoir et une discordance progressive (d'après la notice de la carte géologique de Prades)

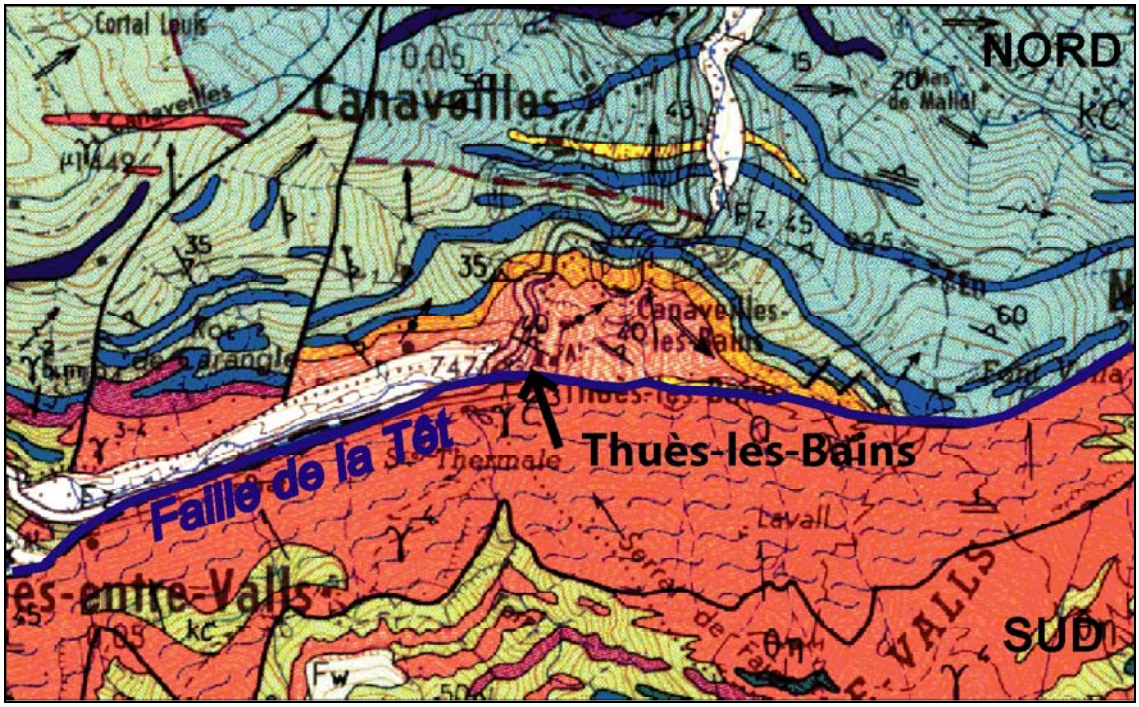


Illustration 28 – Positionnement de la faille de la Têt au niveau local (d'après la carte géologique 1/50 000 de Prades)

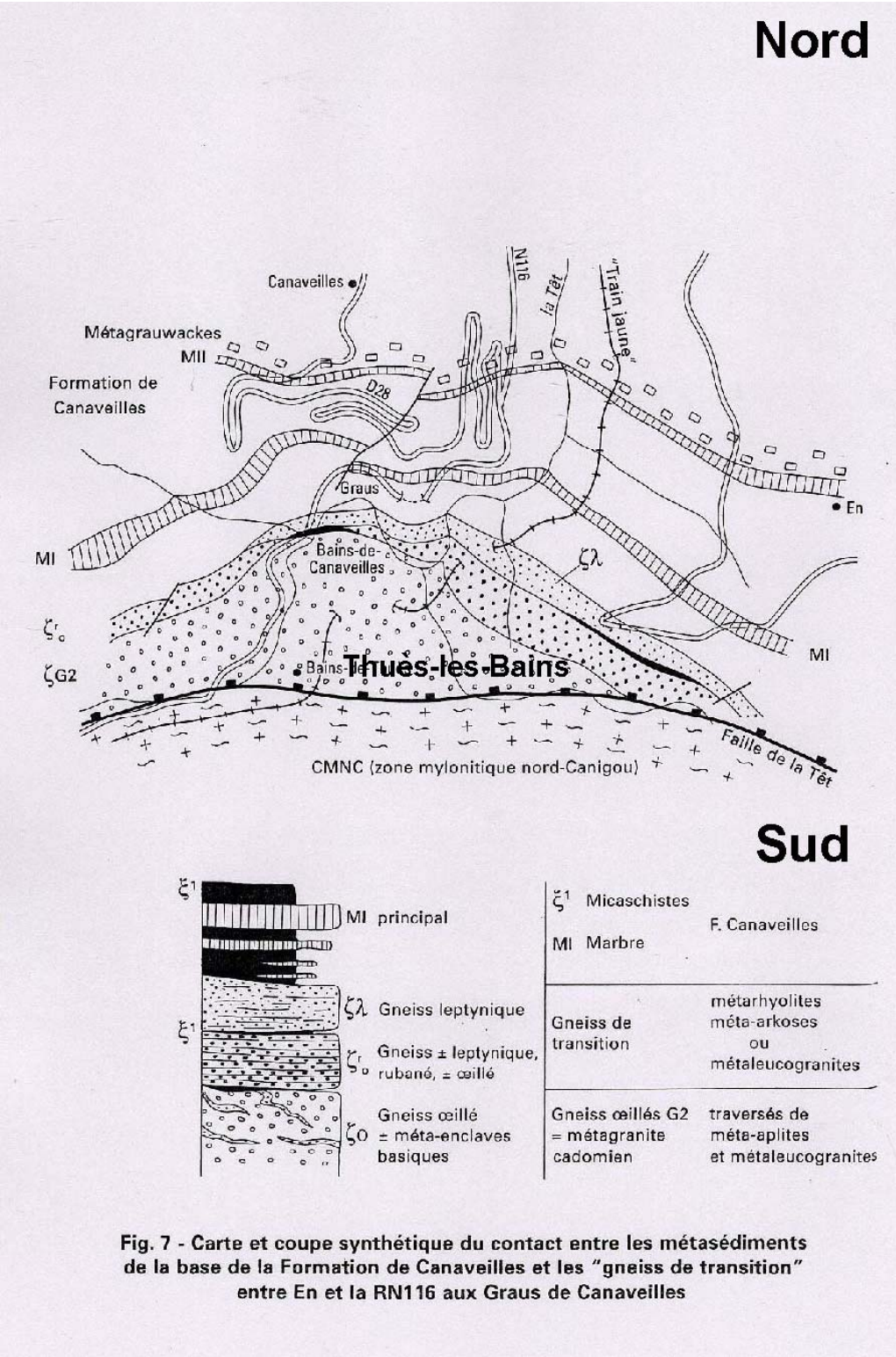


Fig. 7 - Carte et coupe synthétique du contact entre les métasédiments de la base de la Formation de Canaveilles et les "gneiss de transition" entre En et la RN116 aux Graus de Canaveilles

Illustration 29 – Coupe synthétique du contact entre les métasédiments (Formation de Canaveilles) et les "gneiss de transition" (d'après la notice de la carte géologique de Prades)

3.2.5. L'ouverture des objets structuraux

La période propice à l'ouverture de ces objets est la période plioquaternaire soit de 6 Ma à l'actuel qui voit, sur la bordure du Golfe du Lion, une flexuration généralisée de l'ensemble continent/bassin sur une grandeur de l'ordre de 200 km (Duvail et al, 2004 sous presse) avec une amplitude verticale de l'ordre de 2000 m (soit un facteur de 2% de pente). Les massifs continentaux, dont le massif du Canigou, subissent lors de cette phase, des mouvements verticaux qui vont induire l'ouverture des failles et fissures, et créer ainsi un « volume » permettant à l'eau d'être stockée et de circuler.

Ces objets mis en ouverture par cette paragénèse reflètent bien, lorsque ces conditions de cellule hydrothermale sont réunies, les potentialités de cette région d'Olette qui est au cœur du système. En effet, les principes fondamentaux sont réunis :

- une zone d'infiltration permettant la descente des eaux vers les profondeurs, descente guidée par la présence de formations faisant office de barrière imperméable ;

- un massif réservoir en profondeur dans lequel les eaux vont circuler et acquérir leur minéralisation caractéristique à la température du réservoir ;

- un drain, zone de circulation préférentielle permettant la remontée rapide des eaux chaudes jusqu'à la surface.

3.3. LA GÉOLOGIE DES SOURCES AU CAS PAR CAS

A l'échelle plus locale encore des sources thermales du canton d'Olette, la géologie a été abordée par l'interprétation de photos aériennes (à l'échelle 1/50 000) de la zone, complétée par des visites de terrain.

3.3.1. Cartographie des linéaments et de la stratification à partir des photos aériennes

Deux photos aériennes à l'échelle du 1/50 000 de la zone ont été acquises et interprétées. Les résultats sont présentés ci après, sur fond de carte géologique au 1/50 000ème et sur fond topographique IGN au 1/25 000, et concernent les points suivants :

- cartographie de la faille de la Têt ;

- détermination de la zone au Sud de la faille des orthogneiss du Canigou, des facettes de la faille de la Têt, et au Nord de la faille des séries paléozoïques ;

- détermination des grandes failles régionales connectées avec la faille de la Têt ;

- détermination de la virgation des séries paléozoïques au Nord de la faille de la Têt au niveau des Gorges de la Têt. Cette virgation indique un mouvement dextre de cette faille ;

- la faille de la Têt a donc au moins deux jeux principaux :

  - un premier jeu décrochant dextre qui peut être attribué à la période des grands décrochements pyrénéens, soit la période allant du Crétacé à l'Eocène ;

  - le second jeu est essentiellement un jeu vertical relatif d'âge postérieur à la surface fondamentale, soit le Miocène moyen, et antérieur à l'incision messinienne, soit le Miocène supérieur.

3.3.2. Les zones des différentes sources en détail

Elles sont présentées de l'aval vers l'amont.

a) La zone de Nyer

La faille de la Têt est cartographiée au niveau du village de Nyer (Illustration 30). Les émergences chaudes marquées au niveau de la centrale électrique sont liées à cette zone faillée.

Dans la zone de Nyer, la faille présente un pendage de 45°N. Des possibilités de forages existent dans la zone faillée.

Illustration 30 – Le passage de la faille de la Têt dans la zone de Nyer

b) La zone de la source du Figuier (commune de Nyer)

Dans cette zone passe la faille satellite de la faille de la Têt, liée à la virgation des séries paléozoïques (Illustration 31). Le cours de la Têt à ce niveau s'est installé à la faveur de cette faille satellite. Les émergences d'eaux chaudes sont liées à la faille de la Têt et à sa faille satellite.

La difficulté de foration dans cette zone est liée à la difficulté d'accès au site. Il faut forer en direction de la faille de la Têt pour la traverser tout en étant dans le plan des failles satellites. L'épaisseur des séries à traverser dépendra de la distance à la faille

de la Têt (pendage 45° nord soit une épaisseur de l'ordre de 100 m de séries verticales par distance de 100 m à la faille).

Illustration 31 – Passage de la faille satellite dans la zone de la source du Figuier

c) La zone des Graus de Canaveilles (gorges de la Têt)

Cette zone est dans un contexte semblable à celui de la source du Figuier : elle est marquée par la faille satellite de la faille de la Têt liée à la virgation des séries paléozoïques (Illustration 32). Les émergences d'eaux chaudes sont liées à la faille de la Têt et à sa faille satellite.

La difficulté de foration est là aussi liée à la difficulté d'accès au site. Il faut forer en direction de la faille de la Têt pour la traverser tout en étant dans le plan des failles satellites. L'épaisseur des séries à traverser dépendra de la distance à la faille de la Têt (pendage 45° nord soit une épaisseur de l'ordre de 100 m de séries verticales par distance de 100 m à la faille).

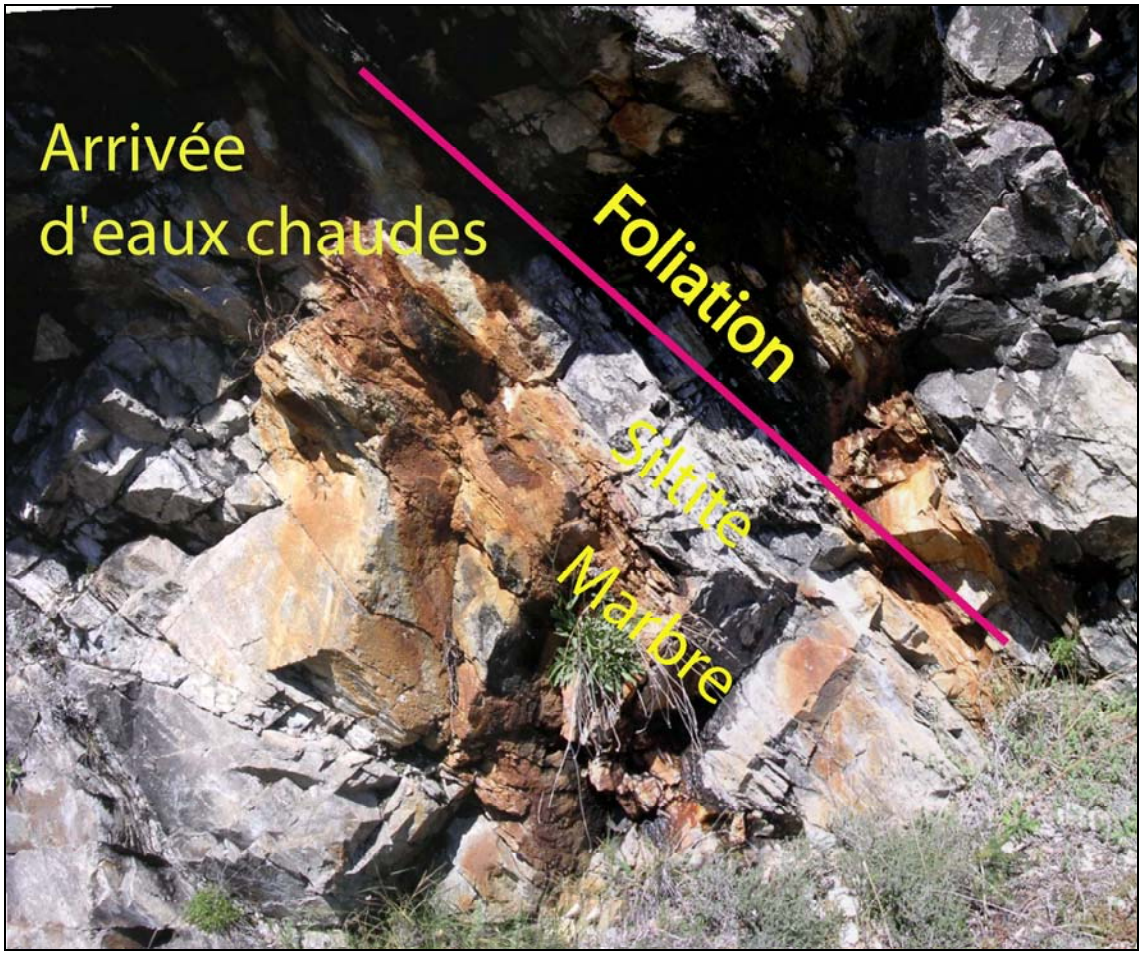


Illustration 32 – Foliation marquée dans les séries paléozoïques, près des Graus de Canaveilles

d) La zone de Thuès-les-Bains

La faille de la Têt est cartographiée dans cette zone, le cours de la Têt s'est installé à la faveur de cette faille (Illustration 33). Les émergences d'eaux chaudes dans cette zone liées à la faille de la Têt et à sa zone mylonitique, roches broyées de bonne perméabilité a priori, et faisant office de drain.

Des possibilités de foration existent dans la zone faillée. Dans cette zone, la faille de la Têt présente un pendage de 45° Nord.

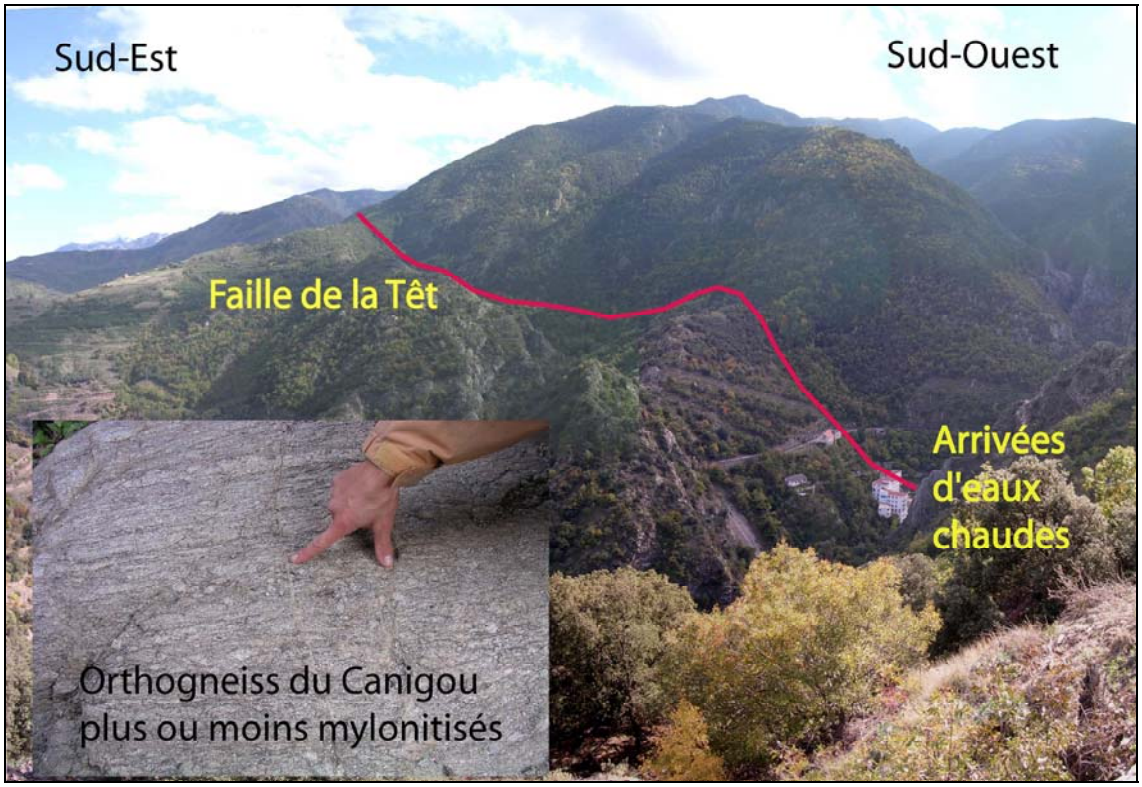

Sud-Est
Sud-Ouest
Faille de la Têt
Arrivées d'eaux chaudes
Orthogneiss du Canigou plus ou moins mylonitisés

Illustration 33 – Passage de la faille de la Têt dans la zone de Thuès-les-Bains

e). La zone de Thuès-entre-Valls

La faille de la Têt est cartographiée dans cette zone. Le contexte est très semblable à celui de la zone proche de Thuès-les-Bains : les émergences d'eaux chaudes sont liées à la faille de la Têt et à sa zone mylonitique.

Des possibilités de foration existent dans la zone faillée. Dans cette zone, la faille de la Têt présente un pendage de 45° Nord. Ce pendage est directement visible sur les facettes marquées des reliefs en rive droite (Illustration 34).

f). La zone des gorges de la Carança

Enfin, une visite légèrement plus en amont, dans les Gorges de la Carança, a permis de donner une indication sur le réservoir de la cellule hydrothermale potentielle de la vallée de la Têt. Les Gorges de la Carança entaillent ce réservoir, rendant apparents deux éléments fondamentaux, visibles sur la photo suivante (Illustration 35) :

- le plan de foliation déterminé dans la zone des orthogneiss du Canigou ;
- la zone de mylonite et de fracturation liée à la présence de la faille de la Têt, cartographiée dans cette zone.

Illustration 34 – Passage de la faille de la Têt dans la zone de Thuès-entre-Valls

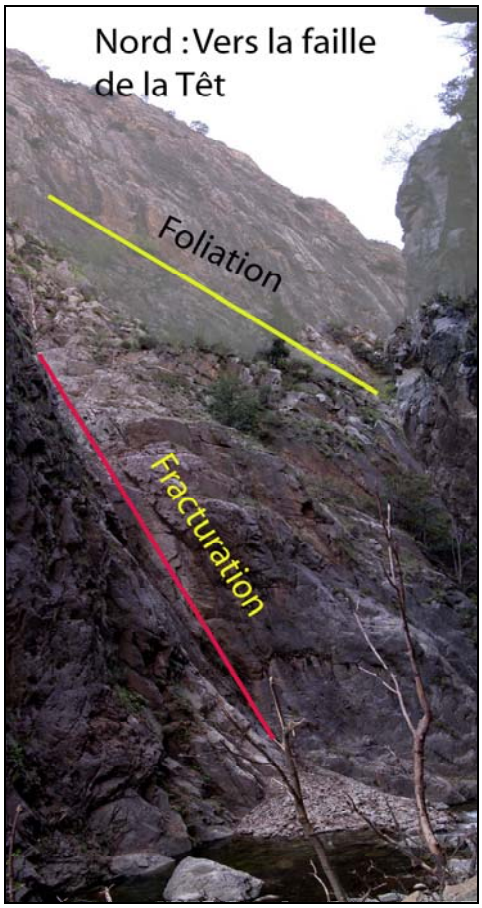


Illustration 35 – Foliation et fracturaton du réservoir, visibles dans les Gorges de la Carança

3.4. CONCLUSION

Il s'agit d'une véritable cellule géothermale qui se met en place au droit du Massif du Canigou au moins dès le Tortonien (11 Ma). Il faut rappeler que dans cette région il existe une **province fluorée** d'origine sans conteste géothermale qui se met en place aussi dès le Tortonien (olistolithe fluoré du gisement du Conflent - Huard, Pélissonnier - 1969).

Cela prouve donc toute l'histoire géothermale de cette région de bordure des grands massifs des Pyrénées Orientales lorsque les conditions géologiques sont réunies avec comme paramètres :

- un massif cristallophyllien structuré servant de « réserves » et permettant les circulations « per descensum » ;

- une auréole métamorphique de roches sédimentaires paléozoïques, structurée et schistosée servant de couverture imperméable, et obligeant ainsi les eaux d'infiltration à descendre en profondeur ;

- un réservoir en profondeur formé par des roches mylonitiques ;
- des accidents majeurs d'une très grande amplitude verticale et horizontale servant de drain « per ascensum », tels la faille de la Têt et une de ses failles satellites.

Les grands principes de la **cellule hydrothermale** du Canton d'Olette sont présentés dans le bloc diagramme suivant (Illustration 36).

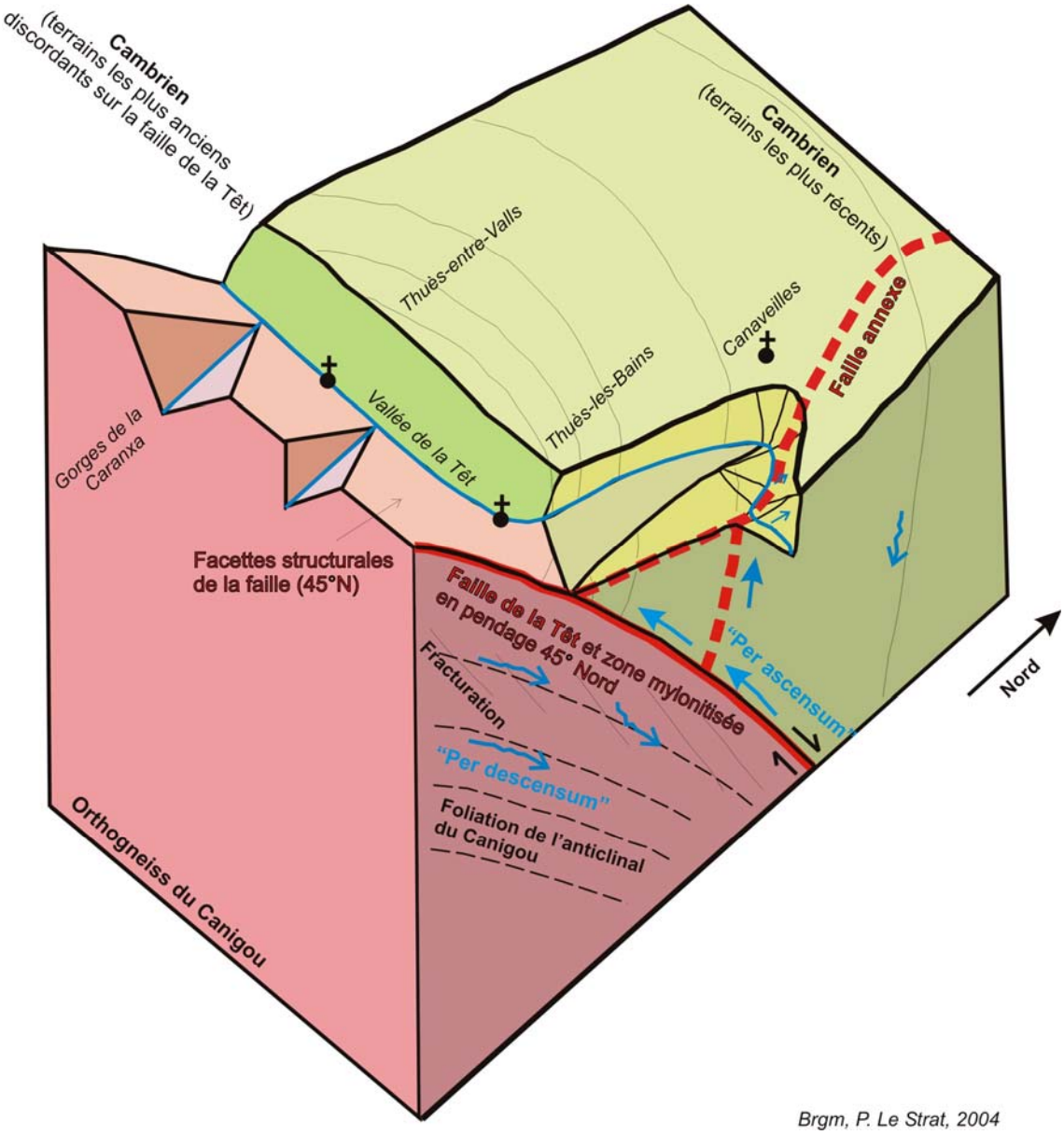


Illustration 36 – Bloc diagramme interprétatif de la cellule hydrothermale du Canton d'Olette

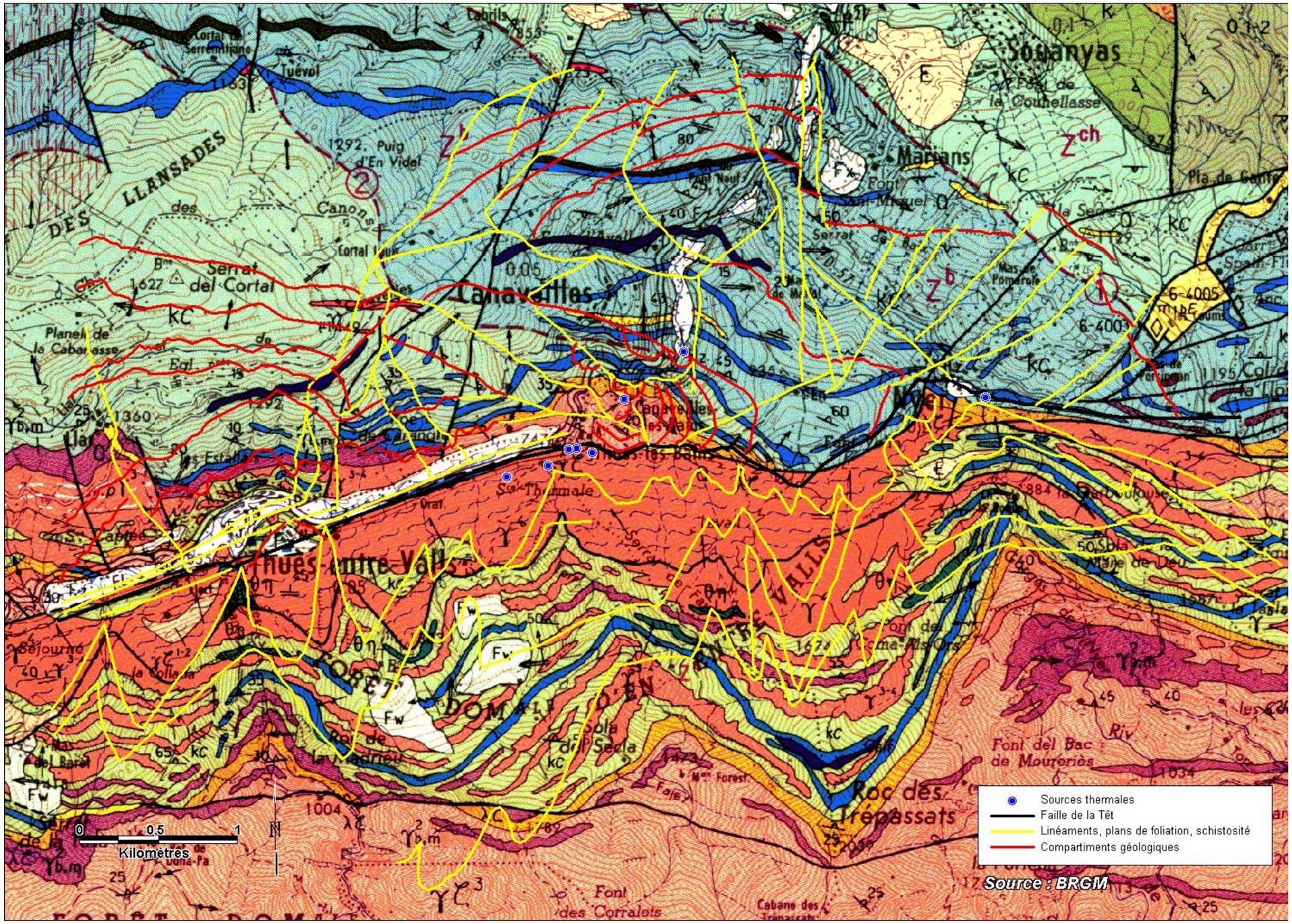


Illustration 37 - Photointerprétation (sur fond de carte géologique au 1/50 000)

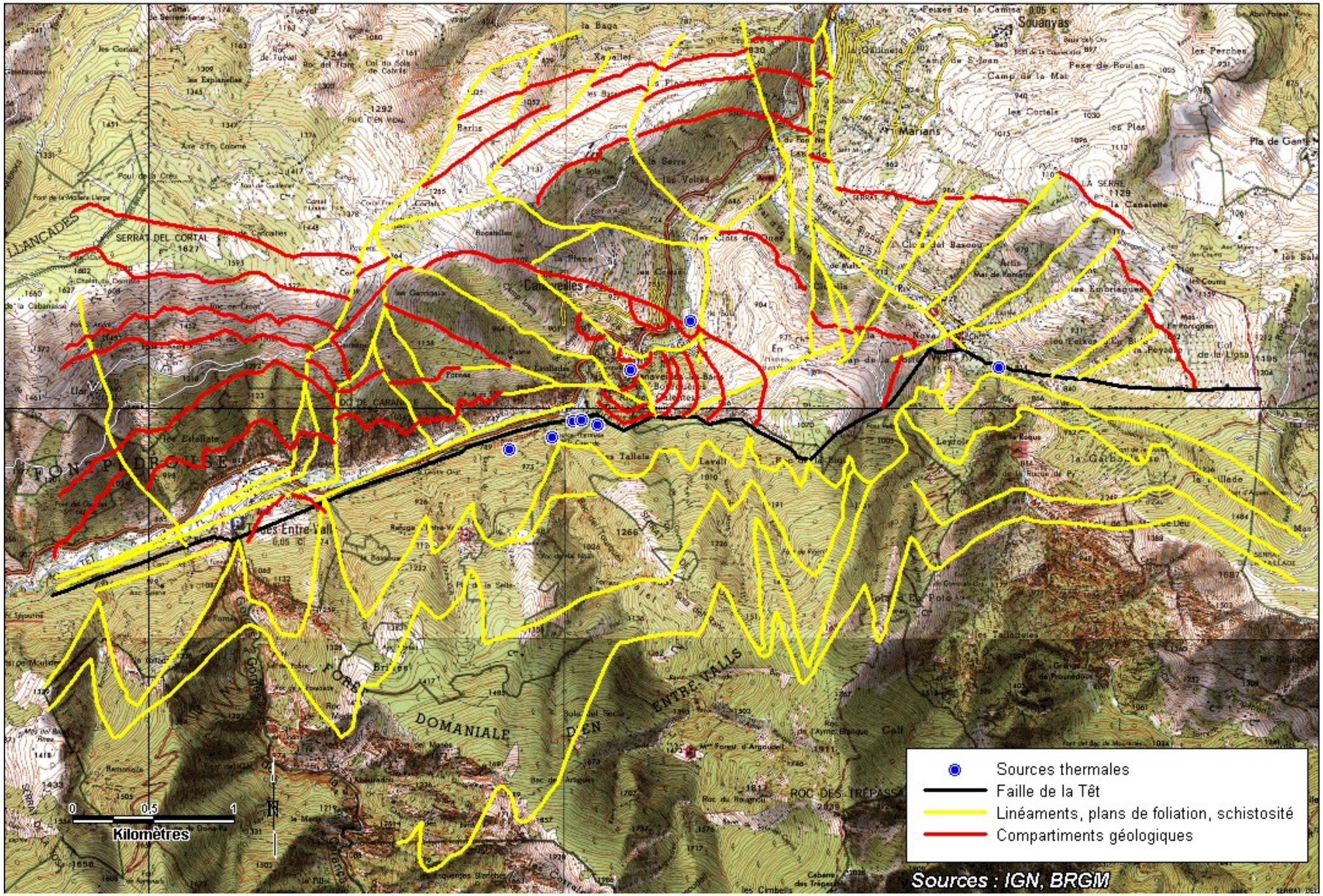


Illustration 38 - Photointerprétation (sur fond de carte IGN au 1/25 000)

4. Evaluation de la qualité des eaux thermales

Sur proposition du BRGM, le SIDECO a décidé fin 2003 d'effectuer des analyses physico-chimiques complètes et des analyses des isotopes de l'eau sur certaines des sources thermales jugées les plus représentatives du Canton d'Olette, afin d'obtenir une meilleure caractérisation du gisement et de la qualité des eaux. Cette partie présente les résultats obtenus.

4.1. OBJECTIFS, SOURCES ET PARAMETRES MESURES

4.1.1. Paramètres recherchés

Compte tenu des circulations souvent complexes des fluides, la caractérisation d'un gisement hydrothermal s'appuie fréquemment sur des analyses chimiques multi-élémentaires et des analyses isotopiques :

- les analyses multi-élémentaires (anions, cations, éléments trace) ont pour objectifs de caractériser le faciès géochimique des eaux, et d'apporter des éléments sur leur parcours entre les lieux d'infiltration et d'émergence (nature des roches traversées, température atteinte dans le réservoir en profondeur,…) ;

- les analyses des isotopes de la molécule d'eau (oxygène 18 ^{18}O, hydrogène lourd ^{2}H, et tritium ^{3}H) apportent quant à elles des éléments sur l'âge de l'eau et sur les secteurs d'infiltration.

Ces mesures permettent donc d'apporter des précisions sur l'origine des fluides et de mieux orienter les recommandations pour la protection des gisements.

La collecte des données sur les sources a montré à la fois que peu d'analyses étaient disponibles, et qu'elles étaient souvent très partielles, par exemple des analyses bactériologiques seules, ou seulement accompagnées de quelques paramètres « globaux » tels que la conductivité. De plus, les premières investigations de terrain ont montré qu'il était possible de prélever in situ des échantillons fiables et représentatifs.

Les campagnes de mesures ont ainsi porté sur des :

- mesures in situ de paramètres physico-chimiques (conductivité et température) ;

- analyses au laboratoire d'anions et cations, majeurs et en trace (34 éléments) ;

- analyses isotopiques de la molécule d'eau (^{2}H, ^{18}O, et ^{3}H).

4.1.2. Choix des sources échantillonnées

Le choix des sources à échantillonner a été guidé par :

- la possibilité d'effectuer un prélèvement fiable et représentatif, au plus proche du point d'émergence (pour éviter les baisses de température, les modifications de composition chimique dues au transit en conditions atmosphériques,…) ;

- l'existence de contrastes de température à l'émergence ;

- l'implantation dans différents contextes géographiques (en rives droite et gauche de la Têt, en bordure de rivière et sur les versants,…).

Ainsi, 4 sources ont été échantillonnées : la source du Figuier, Cascade et Saint-André sur le centre de Thuès-les-Bains, et la source des bains à Canaveilles. Les analyses multi-élémentaires ont concerné ces quatre sources, et les analyses des isotopes de l'eau seulement les deux sources du Figuier et de Saint-André (Illustration 39).

Source	Figuier	Cascade	Saint-André	Des bains « Groupe Amont »
Indice BSS	10956X0022	10955X0025	10956X0015	10956X0012
Commune	Nyer	Nyer	Nyer	Canaveilles
Altitude (mNGF)	695	780	739	700
Date de prélèvement	07/01/2004	08/01/2004	08/01/2004	08/01/2004
Température lors du prélèvement (°C)	54	75	65	64
Conductivité (µS/cm)	293	339	320	319
Analyses-multi-élémentaires	x	x	x	x
Analyses des isotopes de l'eau	x		x	

Illustration 39 – Sources échantillonnées et paramètres mesurés

4.1.3. Quelques notions sur la chimie des eaux souterraines

Un court aperçu des principaux mécanismes qui régissent la composition chimique des eaux souterraines est présenté ici.

a) Notion de cycle hydrogéochimique

La composition des eaux naturelles est déterminée par quelques processus importants qui sont schématisés ci-dessous (Illustration 40). Elle fait intervenir la notion de cycle hydrogéochimique. L'eau représente le mode de transport des éléments, ainsi que le réactif chimique. Lors de son interaction avec les roches (processus de dissolution et de précipitation), vont naître les sols, les sédiments, et les roches sédimentaires. En retour, les substances dissoutes parviennent dans l'eau.

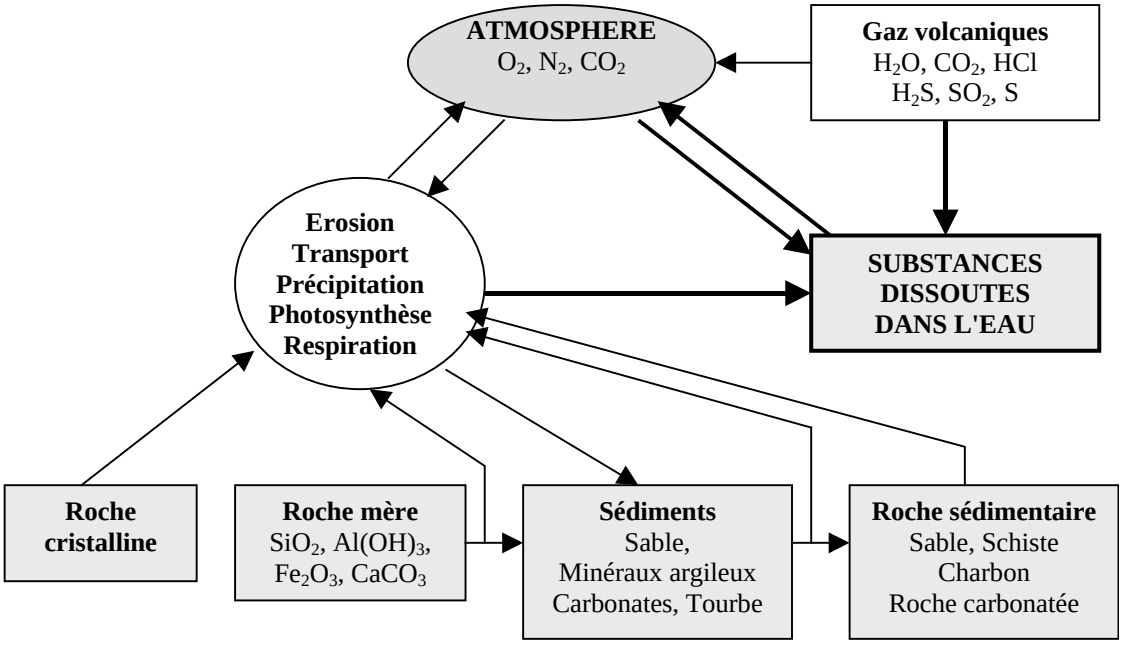


Illustration 40 - Interactions entre le cycle des roches et celui des eaux (d'après Sigg et al., 2000)

b) Constituants naturels des roches magmatiques (ou roches ignées)

Les roches magmatiques sont largement dominantes, et regroupent les formations plutoniques (de type intrusif, telles que les granites), et les formations volcaniques (telles que les basaltes). Ce sont des roches généralement cristallisées, et principalement constituées de silicates $[SiO_4]^{4-}$ (pour près de 95%).

Les éléments le plus abondants dans la croûte terrestre sont ainsi l'oxygène (50%), le silicium Si (26%), l'aluminium Al (7,3%), le fer Fe (4,1%), le calcium Ca (3,2%), le sodium Na (2,3%), le potassium K (2,3%), et le magnésium Mg (2,3%). Le chimisme des matériaux ignés est donc dominé par la silice SiO_2, les silicates $[SiO_4]^{4-}$ (principalement contenus dans les argiles), et les oxydes métalliques.

c) Eléments majeurs, mineurs, traces, dans les eaux souterraines

La chimie des eaux souterraines est dominée par la présence de certains ions plus abondants que d'autres dans les systèmes hydrogéologiques, ou plus facilement mis en solution, qui sont appelés ions majeurs.

Ce sont pour les cations (charge positive) : le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+) et le sodium (Na^+), et pour les anions (charge négative), le bicarbonate (HCO_3^-), le carbonate (CO_3^{2-}), le chlorure (Cl^-), et le sulfate (SO_4^{2-}). La silice sous diverses formes (silicates,…) est également considérée comme un élément majeur.

A côté de ces éléments majeurs, certains ions, dits ions mineurs, peuvent être retrouvés moins fréquemment, et dans des concentrations plus faibles : le bore (B^{3+}), le fer dans ses différents états d'oxydation (Fe^{2+} et Fe^{3+}), le fluor (F^-), le manganèse (Mn^{2+}), le nitrate (NO_3^-), le strontium (Sr^{2+}).

Tous les autres ions ou éléments dont la concentration est en général très faible, sont appelés éléments traces, comme l'aluminium (Al^{3+}), le cuivre (Cu^{2+}), le zinc (Zn^{2+}),…

Certains éléments métalliques, comme le cuivre, le zinc, le chrome (Cr^{3+}), le cobalt (Co^{3+}), le sélénium (Se^{4+}), présents à l'état de traces, sont essentiels pour les organismes. Il s'agit des oligo-éléments, indispensables en quantités minimes. L'augmentation de leur concentration dans l'environnement peut cependant aboutir à des phénomènes de toxicité.

D'autres éléments métalliques ne sont pas nécessaires, et ne peuvent produire que des effets toxiques : métaux lourds tels que l'arsenic (As^{5+}), le cadmium (Cd^{2+}), le mercure (Hg^{2+}) et le plomb (Pb^{4+}). Leur présence est fortement aggravée par les activités humaines, en particulier les industries métallurgiques et l'extraction de minerais, la combustion de combustibles fossiles, la production de ciment.

Des informations complémentaires sur les éléments chimiques peuvent être trouvées en annexe 2.

d). De la composition des roches à la composition des eaux

La composition des eaux n'est cependant pas l'exact reflet de celles des roches encaissantes ou traversées, des phénomènes complexes tels que des modifications d'équilibres chimiques (dues à des modifications de conditions de température, pH, potentiel d'oxydoréduction, vitesse d'écoulement, temps de contact,…) intervenant.

4.2. ANALYSES CHIMIQUES SUR LES SOURCES

Le tableau suivant (Illustration 42) récapitule les résultats des éléments chimiques analysés dans le cadre de cette étude sur les eaux thermales du Canton d'Olette.

Ce tableau donne les limites de détection inférieures (limites de quantification) appliquées par le laboratoire du BRGM qui a effectué ces analyses.

Pour information sont données également les limites et références de qualité fixées dans l'annexe I du décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 (dont le texte complet est donné en annexe 3), relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles.

- l'annexe I-1 fixe les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Les eaux doivent alors respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites de qualité définies ;

- l'annexe I-2 fixe quant à elle des références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine : il s'agit de paramètres indicateurs de qualité témoins du fonctionnement des installations de production et de distribution d'eau (le dépassement des valeurs ou intervalles indiqués entraîne l'application de dispositions spécifiques prévues dans les articles du décret).

4.2.1. Anions et cations majeurs

Les résultats des analyses sur les 4 sources montrent que leur minéralisation est peu accentuée, avec des conductivités de l'ordre de 300 µS/cm (cf. Illustration 42).

Les eaux présentent un **faciès carbonaté sodique** (cf. Illustration 41 et Illustration 43). Elles sont légèrement sulfatées et chlorurées. Elles sont très peu magnésiennes (seule la source du Figuier est au-dessus de la limite de quantification de l'élément), et très peu potassiques.

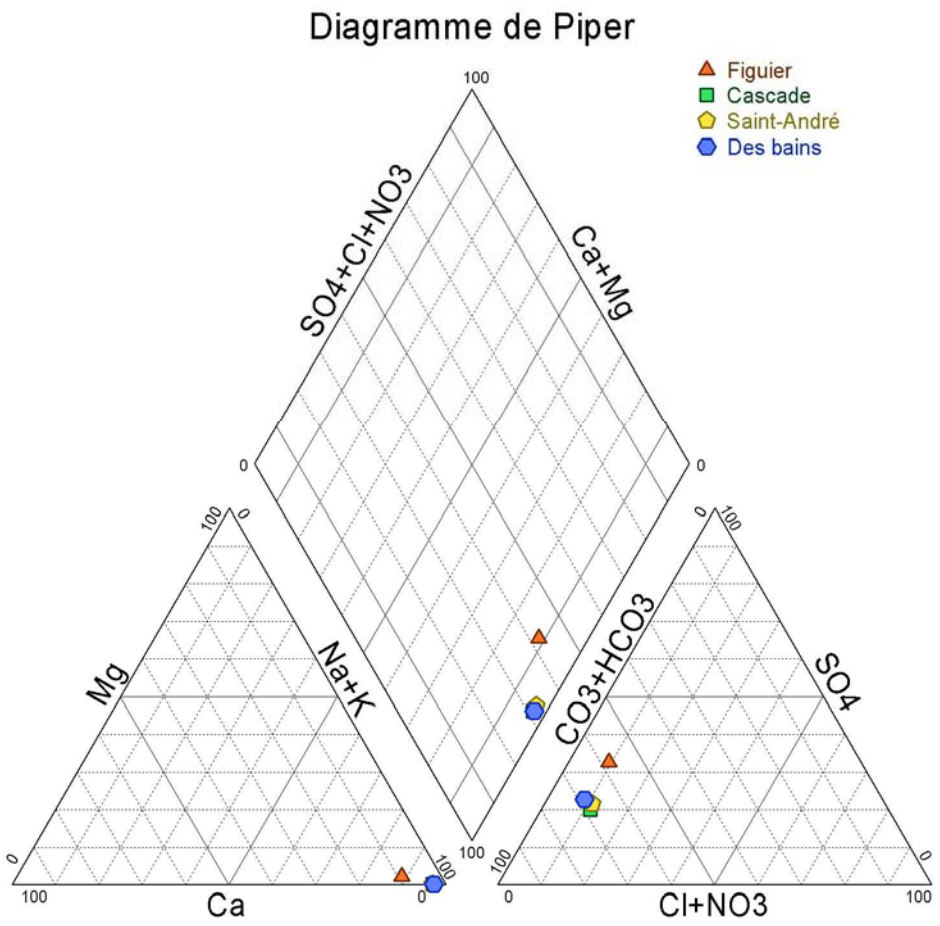


Illustration 41 – Représentation des analyses dans le diagramme de Piper

			Limites et références de qualité			Analyses chimiques Brgm					
			Décret 2001-1220 du 20/12/2001				Source	Figuier (Nyer)	Cascade (Nyer)	Saint-André (Nyer)	Des bains (Canaveilles)
	Code élément	**Nom élément**	**I-1 Limites de qualité**	**I-2 Références de qualité**	**Unité**	LQ[9]	Unité[10]	**07/01/04**	**08/01/04**	**08/01/04**	**08/01/04**
1	Al	Aluminium		200	µg/l	30	µg/l	< LQ	71	53	36
2	NH4	Ammonium exprimé en NH4		0,1	mg/l	0,1	mg/l	< LQ	0,2	0,2	0,2
3	Sb	Antimoine	5,0		µg/l	5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
4	Ag	Argent				5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
5	As	Arsenic	**10**		µg/l	10	µg/l	**31**	< LQ	< LQ	< LQ
6	Ba	Baryum	0,7		mg/l	5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
7	Be	Béryllium				5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
8	HCO3	Bicarbonates				5	mg/l	69	36	36	37
9	B	Bore	1,0		mg/l	20	µg/l	144	303	286	156
10	Cd	Cadmium	5,0		µg/l	2	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
11	Ca	Calcium				0,1	mg/l	4,9	1,6	1,6	1,5
12	CO3	Carbonates				5	mg/l	9	32	31	32
13	Cl	Chlorures		250	mg/l	0,1	mg/l	7,6	9,6	9,4	7,6
14	Cr	Chrome	50		µg/l	5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
15	Co	Cobalt				2	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
16	Cu	Cuivre	2,0	1	mg/l	2	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
17	CNT	Cyanures totaux	50		µg/l	0,01	mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
18	Fe	Fer		200	µg/l	0,02	mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
19	F	Fluorures	**1,5**		mg/l	0,1	mg/l	**5,8**	**1,8**	**7,2**	**6,6**

[9] LQ : Limite de Quantification

[10] 1 mg/l = 1000 µg/l

			Limites et références de qualité			Analyses chimiques Brgm					
			Décret 2001-1220 du 20/12/2001				Source	Figuier (Nyer)	Cascade (Nyer)	Saint-André (Nyer)	Des bains (Canaveilles)
	Code élément	Nom élément	I-1 Limites de qualité	I-2 Références de qualité	Unité	LQ	Unité	07/01/04	08/01/04	08/01/04	08/01/04
20	Li	Lithium				10	µg/l	68	86	83	87
21	Mg	Magnésium				0,1	mg/l	0,7	< LQ	< LQ	< LQ
22	Mn	Manganèse		50	µg/l	5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
23	Ni	Nickel	20		µg/l	5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
24	NO3	Nitrates exprimés en NO3	50		mg/l	0,1	mg/l	1,1	< LQ	< LQ	< LQ
25	NO2	Nitrites exprimés en NO2	0,50		mg/l	0,01	mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
26	PO4	OrthoPhosphates en PO4				0,1	mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
27	Pb	Plomb	10		µg/l	2	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
28	K	Potassium				0,3	mg/l	2,5	2,4	2,4	2,3
29	Se	Sélénium	10		µg/l	10	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
30	SiO2	Silice				0,5	mg/l	66,2	83,7	84,7	80,8
31	Na	Sodium		200	mg/l	0,1	mg/l	52,6	59,2	59,3	60,3
32	Sr	Strontium				10	µg/l	35	29	28	31
33	SO4	Sulfates		250	mg/l	0,1	mg/l	39	23,1	24,8	26,6
34	Zn	Zinc				5	µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
						Analyses in situ					
						Conductivité (µS/cm)		293	339	320	319
						Température (°C)		54	75	65	64

Illustration 42 – Résultats des analyses chimiques multi-élémentaires

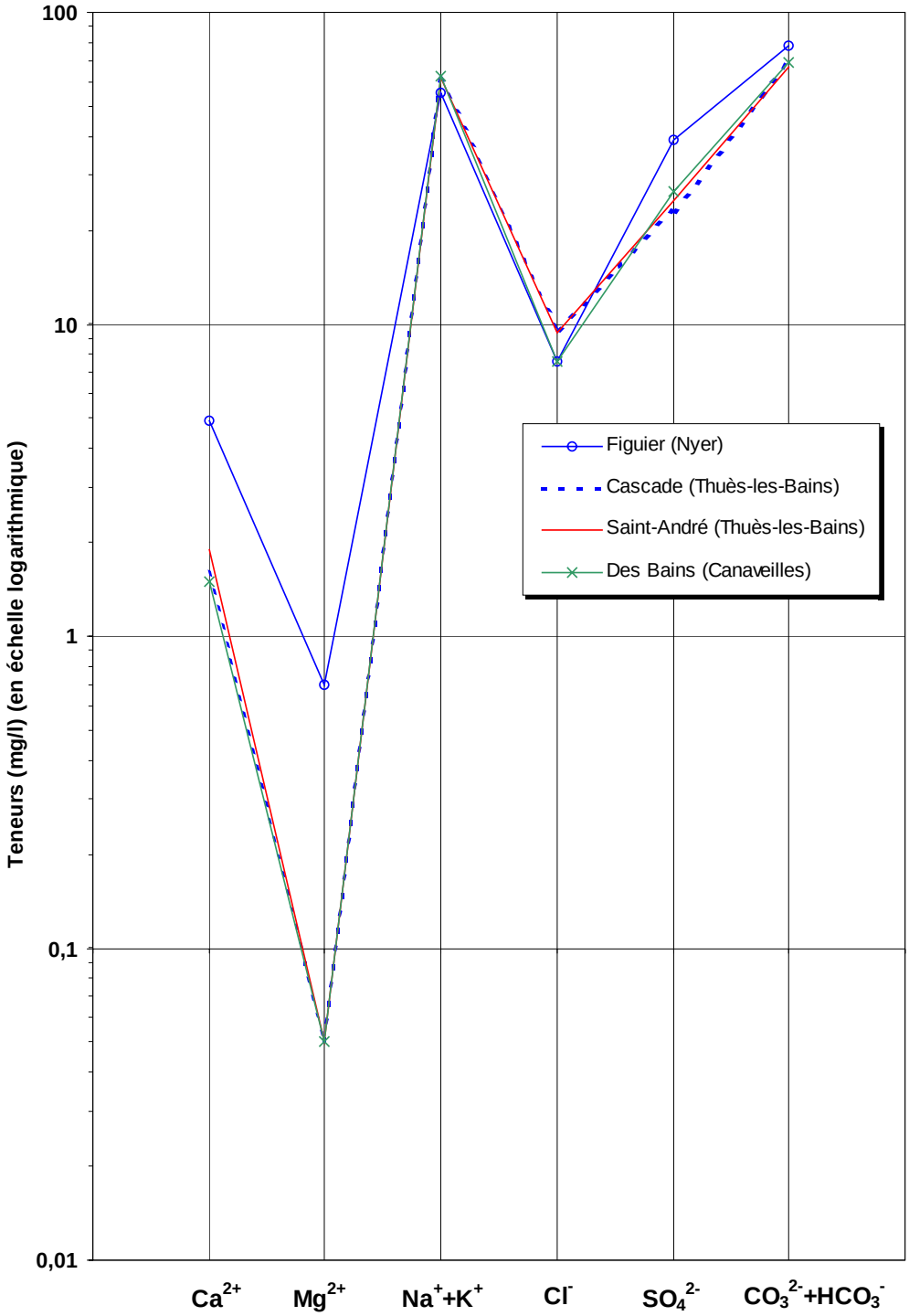


Illustration 43 – Représentation des analyses dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff

Les trois sources Cascade, Saint-André et des bains présentent des teneurs en éléments majeurs très semblables. La source du Figuier est légèrement différente en plusieurs points :

- sa teneur en bicarbonates (69 mg/l) est supérieure à celle en carbonates (9 mg/l), alors que pour les trois autres sources, les teneurs sont comparables et de l'ordre de 30-40 mg/l. Ceci pourrait être expliqué par un pH un peu plus acide pour la source du Figuier, que pour les sources thermales de Thuès-les-Bains qui présentent un pH basique, légèrement supérieur à 9 (Illustration 44).

- Elle est légèrement plus chargée en calcium, magnésium, sodium et sulfates, et moins chargée en silice.

La stabilité dans le temps des différents paramètres chimiques est un point important pour la caractérisation des eaux minérales au sens large. Il n'a pu être abordé ici avec les résultats d'une seule analyse. Cependant, les statistiques simples réalisées sur les analyses effectuées régulièrement sur les sources du centre de Thuès-les-Bains par l'Institut Bouisson Bertrand (données récupérées auprès de la DDASS66) permettent de penser que les caractéristiques des eaux présentent une bonne stabilité dans le temps, comme par exemple pour la source de Saint-André (Illustration 44).

Source de Saint-André, CTRRF de Thuès-les-Bains				
Paramètre	Température (°C)	Sulfures totaux (mg/l)	pH	Conductivité à 20°C (µS/cm)
Moyenne(*)	73,4	5,67	9,20	257,9
Ecart-type(*)	0,9	0,58	0,15	5,6

(*) : Statistiques réalisées sur 23 analyses effectuées de 1997 à 2003

Illustration 44 – Source de Saint-André, d'après les analyses de Bouisson-Bertrand

4.2.2. Anions et cations en trace, micropolluants métalliques

Les quatre sources analysées présentent la caractéristique d'être **fluorées**, leurs concentrations en fluorures dépassant 1 mg/l. On retrouve ici dans le chimisme des eaux, une manifestation du district fluoré que constitue la partie hercynienne des Pyrénées Orientales. La fluorine (CaF_2) est ainsi fréquente dans les niveaux carbonatés de la série de Canaveilles (Billa, 1980). On la trouve dans les roches magmatiques alcalines (granites par exemple), et aussi dans les filons, en association avec d'autres éléments tels que la barytine (sulfate $BaSO_4$ qui peut être présent dans les filons hydrothermaux), et des sulfures métalliques tels que la blende (ZnS), la galène (PbS), et la chalcopyrite ($CuFeS_2$).

Les quatre sources présentent également de fortes teneurs en **lithium**, élément métallique lié aux silicates, ainsi qu'en **strontium**, élément caractéristique des filons hydrothermaux.

Les teneurs en fer et manganèse sont très faibles, puisqu'en deçà de la limite de quantification.

Tout comme pour les anions et cations majeurs, la source du Figuier présente quelques particularités par rapport aux trois autres sources :

- sa teneur en aluminium est en deçà de la limite de quantification (< 30 µg/l) ;
- à l'inverse, elle est la seule source à présenter une teneur en arsenic au delà de la limite de quantification de 10 µg/l, avec 31 µg/l d'arsenic.

4.2.3. Confrontation des résultats aux différentes normes de qualité

En fonction de l'utilisation des eaux thermales qui pourra être envisagée, il est intéressant de confronter les résultats des analyses avec différentes normes de qualité.

Les limites de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine (Décret 2001-1220, cf. le texte complet donné en annexe 3), ont été données précédemment (Illustration 42). Sur les 34 éléments analysés, seuls les fluorures sont en dépassement pour les quatre sources, ainsi que l'arsenic pour la source du Figuier seule.

Les eaux minérales naturelles destinées à l'embouteillage ne sont pas soumises à ce décret, mais à la nouvelle directive européenne 2003/40/CD du 16 mai 2003. Cette Directive 2003/40/CE du 16/05/2003 de la Commission Européenne fixe *la liste, les limites de concentrations, et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source*.

L'annexe 1 de cette directive donne les *16 constituants naturellement présents dans les eaux minérales naturelles, et leurs limites maximales dont le dépassement peut présenter un risque pour la santé publique* (cf. le texte donné en annexe 4)

Sur ces 16 éléments, seul le mercure n'a pas été analysé. Les résultats d'analyses sur les 15 autres éléments montrent que seuls les fluorures et l'arsenic sont en dépassement (Illustration 45) :

- la limite en fluorures de 5,0 mg/l est dépassée pour les trois sources Figuier, Saint-André et des Bains ;
- la limite en arsenic de 0,010 mg/l est dépassée pour la source du Figuier.

			Source	**Figuier**	**Cascade**	**Saint-André**	**Infante**
	Constituants	Limites maximales Directive (mg/l)	*Limite de Quantification Brgm (mg/l)*	07/01/04	08/01/04	08/01/04	08/01/04
1	Antimoine	0,0050	*0,005*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
2	Arsenic	0.010 (total)	*0,01*	**0,031**	< 0,010	< 0,010	< 0,010
3	Baryum	1,0	*0,005*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
4	Bore	P.M. (*)	*0,02*	0,144	0,303	0,286	0,156
5	Cadmium	0,003	*0,002*	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
6	Chrome	0,050	*0,005*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
7	Cuivre	1,0	*0,002*	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
8	Cyanures	0,070	*0,01*	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
9	Fluorures	5,0	*0,1*	**5,8**	1,8	**7,2**	**6,6**
10	Plomb	0,010	*0,002*	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
11	Manganèse	0,5	*0,005*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
12	Mercure	0,0010					
13	Nickel	0,020	*0,005*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
14	Nitrates	50	*0,1*	1,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
15	Nitrites	0,1	*0,01*	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
16	Sélénium	0,010	*0,01*	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

(*) : La limite maximale pour le bore sera fixée si nécessaire, après avis de l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments, et sur proposition de la Commission, avant le 1er janvier 2006.

Illustration 45 – Comparaison des analyses avec les limites des 16 constituants relatifs aux eaux minérales naturelles (Annexe I de la Directive 2003/40/CD)

4.3. ANALYSES ISOTOPIQUES

4.3.1. Principes d'utilisation des isotopes stables et radioactifs

Les méthodes isotopiques sont souvent performantes pour aider à interpréter la circulation des eaux, en se servant des isotopes comme des traceurs de l'eau dans son milieu naturel, et apporter des réponses aux questions qui se posent :

- la localisation de la zone d'alimentation, du réservoir principal (nature des roches et profondeur), la caractérisation des roches rencontrées lors de la remontée, la recherche de l'origine du caractère hydrothermal ;

- les modifications de la composition chimique des eaux entre le réservoir origine et la zone d'émergence (réactions chimiques et biochimiques, mélanges avec d'autres eaux) ;

- enfin la détermination de l'âge de l'eau.

Les rapports de deux **isotopes stables** d'un même composé (isotope lourd rare sur isotope léger banal), sont utilisés, le plus souvent :

- ceux de la molécule d'eau : $^{18}O/^{16}O$, $^{2}H/^{1}H$;

- ceux des espèces dissoutes $^{13}C/^{12}C$ du gaz carbonique ou des bicarbonates, $^{34}S/^{32}S$ des sulfates, $^{15}N/^{14}N$ des nitrates, …

En effet, les abondances isotopiques permettent d'identifier l'origine des constituants, et de reconstituer les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui ont affecté la répartition isotopique (appelée fractionnement).

Les isotopes **radioactifs**, tels que le tritium (^{3}H) de la molécule d'eau, le carbone 14 (^{14}C), et le chlore 36 (^{36}Cl) se désintègrent régulièrement avec le temps, suivant une constante de temps (période de décroissance radioactive[11]) propre à chaque élément. Ils peuvent permettre des mesures d'âge de l'eau, sous certaines conditions (Blavoux, 1995) :

- de connaître l'activité originelle de l'eau de pluie au moment de son infiltration dans la zone d'alimentation de la source étudiée ;

- de vérifier qu'une production in situ et/ou une dilution par mélange avec des eaux plus superficielles ou par échange ne viennent pas perturber la seule décroissance radioactive et par là fausser l'interprétation.

Le tableau ci-dessous indique quelques propriétés des isotopes de la molécule d'eau, les plus souvent employés (DNEMT, 1995-2000) :

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

Illustration 46 - Caractéristiques de isotopes de la molécule d'eau

[11] La période de décroissance radioactive est définie comme la durée nécessaire pour que l'activité radioactive initiale soit diminuée de moitié.

4.3.2. Utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau ^{18}O et ^{2}H

a) Principe

L'oxygène 18 et le deutérium sont stables et présents en concentration significative. Les variations des teneurs en isotopes stables des eaux restent très faibles pour les phénomènes naturels (quelques fractions de %). La composition isotopique est alors habituellement représentée par la fonction δ ou « part pour mille », en valeur relative par rapport à un standard, selon l'équation suivante (Illustration 47) :

$$\delta\,(pour\ mille) = \left(\frac{R\,échantillon}{R\,\text{standard}} - 1\right)\times 1000$$

Illustration 47- Expression de la composition isotopique

où : $R = \dfrac{abondance\,de\,l'\,isotope\,lourd}{abondance\,de\,l'\,isotope\,léger}$

Le dosage s'effectue par spectrométrie de masse. Pour l'eau et donc pour l'oxygène 18 et le deutérium, le standard est un échantillon étalon constitué par le SMOW (Standard Mean Ocean Water), représentatif de la totalité de l'hydrosphère, avec les rapports suivants (Raymahashay, 1996) : $^{16}H_2O$: $^{18}H_2O$: $^{17}H_2O$: HDO = 10^6 : 2000 : 420 : 316.

b) Origine météorique des eaux

Les précipitations montrent, dans un diagramme $\delta D - \delta^{18}O$, une corrélation linéaire de pente 8, caractéristique du phénomène de condensation qui se produit toujours à saturation, donc à l'équilibre.

L'ordonnée à l'origine (ou excès de deutérium), peut elle varier d'une région à une autre en fonction de l'origine de la vapeur qui condense :

- la vapeur océanique (cas le plus fréquent) donne des précipitations avec un excès en deutérium de +10 (Illustration 48). Cette droite établie par (Craig, 1961) constitue la droite de référence pour les précipitations d'origine océanique à l'échelle mondiale ;

- les pluies du domaine méditerranéen oriental ont un excès en deutérium de +22 (Illustration 49) ;

- des différentiations locales sont aussi perceptibles, par exemple pour le périmètre d'alimentation des sources du Vivarais (Fouillac, 1989), avec un excès en deutérium de 15,2 (Illustration 50).

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$$

Illustration 48- Droite de référence des eaux météoriques d'origine océanique à l'échelle mondiale (Craig, 1961)

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 22$$

Illustration 49 - Droite de référence des eaux météoriques du domaine méditerranéen oriental

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 15{,}2$$

Illustration 50- Droite de référence des eaux météoriques en Ardèche, en zone d'alimentation des sources du Vivarais (Fouillac, 1989)

En considérant les teneurs en teneurs en oxygène 18 et en deutérium, il apparaît maintenant certain que toutes les eaux minérales françaises ont une origine météorique et non juvénile (Blavoux, 1995). En effet :

- elles présentent à leur émergence des teneurs en oxygène 18 et en deutérium toujours assez proches à la fois de la composition isotopique des eaux météoriques locales, et de celles de sources non minérales situées dans leur environnement ;

- elles se situent, dans un diagramme $\delta D - \delta^{18}O$, sur la droite de référence des eaux météoriques définie par Craig (Illustration 48).

c) Altitude de la zone d'alimentation

Les teneurs isotopiques des pluies varient en fonction de l'altitude, conséquence de la dépendance qui existe, sous nos latitudes et à l'échelle des valeurs moyennes, entre les teneurs isotopiques et la température moyenne au sol. Il est alors possible 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 régionale peut être construite à partir des teneurs des pluies et/ou (de préférence) de sources superficielles aux bassins versants bien connus et sélectionnés à différentes altitudes.

Par exemple, (Fouillac, 1989) présente les gradients altimétriques obtenus pour les teneurs en deutérium et oxygène 18, pour les sources de l'Ardèche (Illustration 51) :

$$\delta D = -0{,}025h - 24{,}43$$
$$\delta^{18}O = -0{,}003h - 5{,}16$$

Illustration 51- Gradients altimétriques pour les sources de l'Ardèche (Fouillac, 1989)

où h est l'altitude (en mètres NGF).

Ces relations peuvent alors être utilisées pour estimer les altitudes des aires de recharge des sources minérales profondes.

4.3.3. Utilisation du tritium ^3H

a) Dosage du Tritium

Le tritium (^3H) est rarissime à l'état naturel (Illustration 46) : il est produit naturellement dans la haute atmosphère par bombardement cosmique des atomes d'azote ($^{14}N + 1n \rightarrow {}^{12}C + {}^3H$). Il est instable, et émetteur bêta (β^-) de période 12,43 années, selon la réaction $^3H \rightarrow {}^3He + \beta^-$.

Bien que faible, cette radioactivité β est mesurée par spectrométrie à scintillation liquide, après enrichissement électrolytique des échantillons. Les concentrations sont exprimées en unité Tritium (UT), exprimant le rapport $^3H/^1H$. Par définition, 1 UT correspond à l'activité d'une eau qui contient 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes de ^1H.

b) Datation de l'eau minérale par le tritium

La teneur du tritium d'origine naturelle dans les pluies est de l'ordre de 5 UT.

La plus forte production de tritium est en fait d'origine artificielle, elle a commencé avec les premiers essais de la bombe « H » en 1952. Les essais aériens ont provoqué de fortes injections de tritium dans la stratosphère, qui ont ensuite ensemencé les pluies (les teneurs en tritium dans les précipitations ont été multipliées par 1000 en 1963 sous nos latitudes). Depuis l'accord sur les arrêts nucléaires aériens (après les essais massifs de 1962/1963), les teneurs en tritium artificiel du réservoir stratosphérique ont décru, mais le taux moyen de délestage est ralenti depuis 1970 du fait du nombre croissant de réacteurs nucléaires qui larguent des bouffées actives.

La production artificielle de tritium depuis 1952 permet de différencier les eaux minérales qui résultent de précipitations sans ^3H nucléaire d'avant 1952, de celles qui résultent de précipitations postérieures à cette date, et contenant du ^3H artificiel. **Le seuil de différentiation se situe actuellement à 1 UT**.

L'interprétation des teneurs en Tritium pour déterminer l'âge de l'eau est conditionnée par la connaissance que l'on peut avoir par ailleurs (par exemple, au travers des études géochimiques) de la représentativité de l'échantillon mesuré (eau profonde non mélangée avec des eaux de surface par exemple).

4.3.4. Résultats des analyses isotopiques sur les sources thermales

Le tableau suivant présente les résultats des analyses isotopiques obtenues sur les 2 sources thermales du Figuier et de Saint-André (Illustration 52). Ces analyses ont été effectuées au laboratoire d'analyses du BRGM, selon les modes d'analyse suivants :

- mesure des rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène par spectrométrie de masse en phase gazeuse, par la méthode d'équilibration avec un gaz (H_2 pour l'hydrogène, CO_2 pour l'oxygène) ;

- mesure de l'activité du tritium, après enrichissement électrolytique, par comptage sur compteur à scintillation liquide (TRI-CARB 2250 CA PACKARD).

					δ18O (‰) vs SMOW[12]	**δ2H (‰) vs SMOW**	**Tritium**
Source	**Indice BSS**	**Altitude (mNGF)**	**T (°C)**	**Date**	(+/- 0,1 ‰)	(+/- 0,8 ‰)	UT
Figuier	1095-6X-0022	695	54	07/01/04	-11,3	-77,9	2 +/- 1
Saint-André	1095-6X-0015/SAME	739	65	08/01/04	-11,5	-78,5	< 1

Illustration 52 – Résultats des analyses isotopiques sur les sources

a) Interprétation des résultats en isotopes stables de l'eau

La figure suivante présente les variations des compositions isotopiques en oxygène 18 et deutérium pour les 2 sources, avec les 3 droites de référence (Illustration 53) :

- pour les précipitations du bassin méditerranéen oriental (Illustration 49) ;

- pour les précipitations d'origine océanique (Illustration 48) ;

- pour les précipitations du Massif Central Sud (Illustration 50).

Ont été ajoutés pour comparaison les résultats des analyses isotopiques pratiquées en 1994, et qui concernent les sources Beauté et Saint-André (données extraites de la Banque de Données Isotopiques du Brgm).

Cette figure confirme l'origine météorique de ces sources thermales, puisqu'elles sont toutes proches des droites météoriques.

Il n'a pas été possible de déterminer une droite régionale isotope stable/altitude. En effet, au vu de la Banque de Données Isotopiques du Brgm, les analyses isotopiques retrouvées portent essentiellement sur des eaux souterraines, il n'existe que très peu d'analyses concernant les pluies et/ou les eaux de surface. Pour avoir tout de même une estimation de l'altitude de recharge des sources, nous avons donc utilisé les gradients altimétriques établis pour les sources de l'Ardèche (Illustration 51). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Illustration 54) :

Les altitudes des aires de recharge estimées sont de l'ordre de 2100 m, altitudes que l'on peut retrouver au sud et sud-est des sources, sur les flancs nord-ouest du massif

[12] Standard Mean Ocean Water, cf. §0

du Canigou (Pic de Très Estelles, 2099m par exemple), et au nord des sources, en remontant sur le Pic de la Pelade, et le Pic d'Escoulou (Illustration 55).

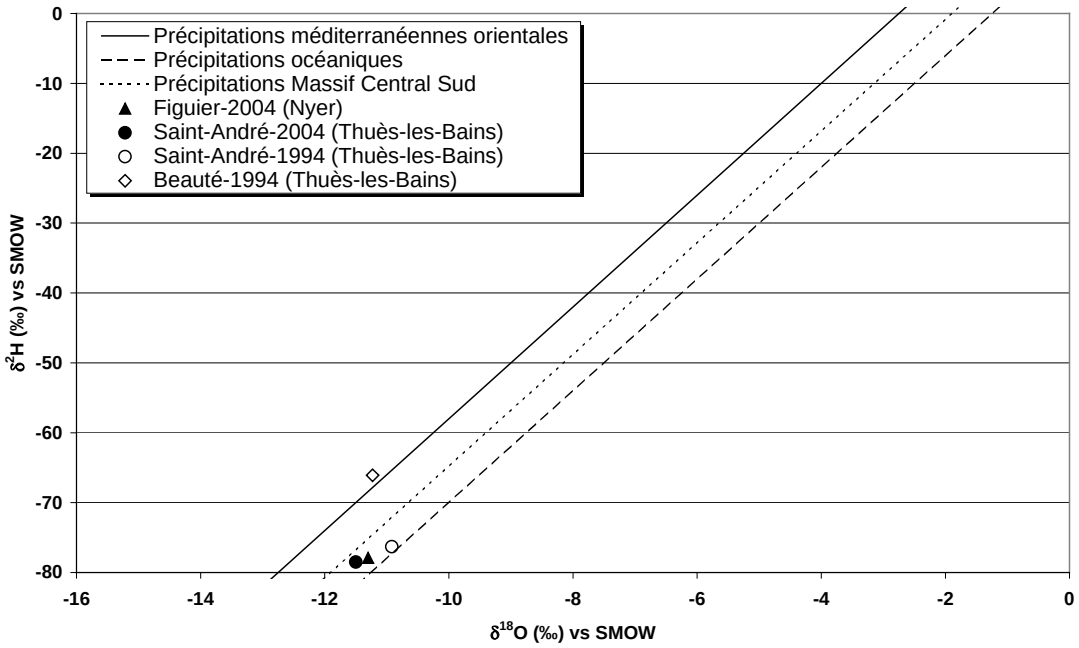


Illustration 53 – Variations des compositions isotopiques en ^{18}O et ^{2}H pour les sources

		Altitudes des aires de recharge			**Dénivelée recharge/source**	
	Altitude source	**Estimée avec δ^2H**	**Estimée avec $\delta^{18}O$**	**ΔH[13]**	**Estimée avec δ^2H**	**Estimée avec $\delta^{18}O$**
Source	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Figuier	695	2139	2047	92	1444	1352
Saint-André	739	2163	2113	49	1424	1374

Illustration 54 – Estimation des altitudes des aires de recharge des sources

L'estimation des altitudes des aires de recharge permet de donner une indication sur leur emplacement. Ces altitudes suggèrent des aires de recharge éloignées de plusieurs kilomètres de l'émergence même, avec des dénivelées de l'ordre de 1400 m qui créent l'énergie potentielle d'infiltration.

De part et d'autre de la faille de la Têt, les pendages des couches (pendage vers le nord pour le massif du Canigou, pendage sud des terrains cambriens en rive gauche

[13] Différence entre les altitudes estimées avec ^{2}H et avec ^{18}O.

de la Têt, cf. Illustration 36) sont favorables pour « guider » les eaux de pluies infiltrées vers les profondeurs, où elles pourront rencontrer les zones de faille et remonter vers la surface.

Cependant, en l'absence de références locales pour les teneurs des pluies et des eaux de surface proches des sources, l'interprétation est à prendre avec précaution.

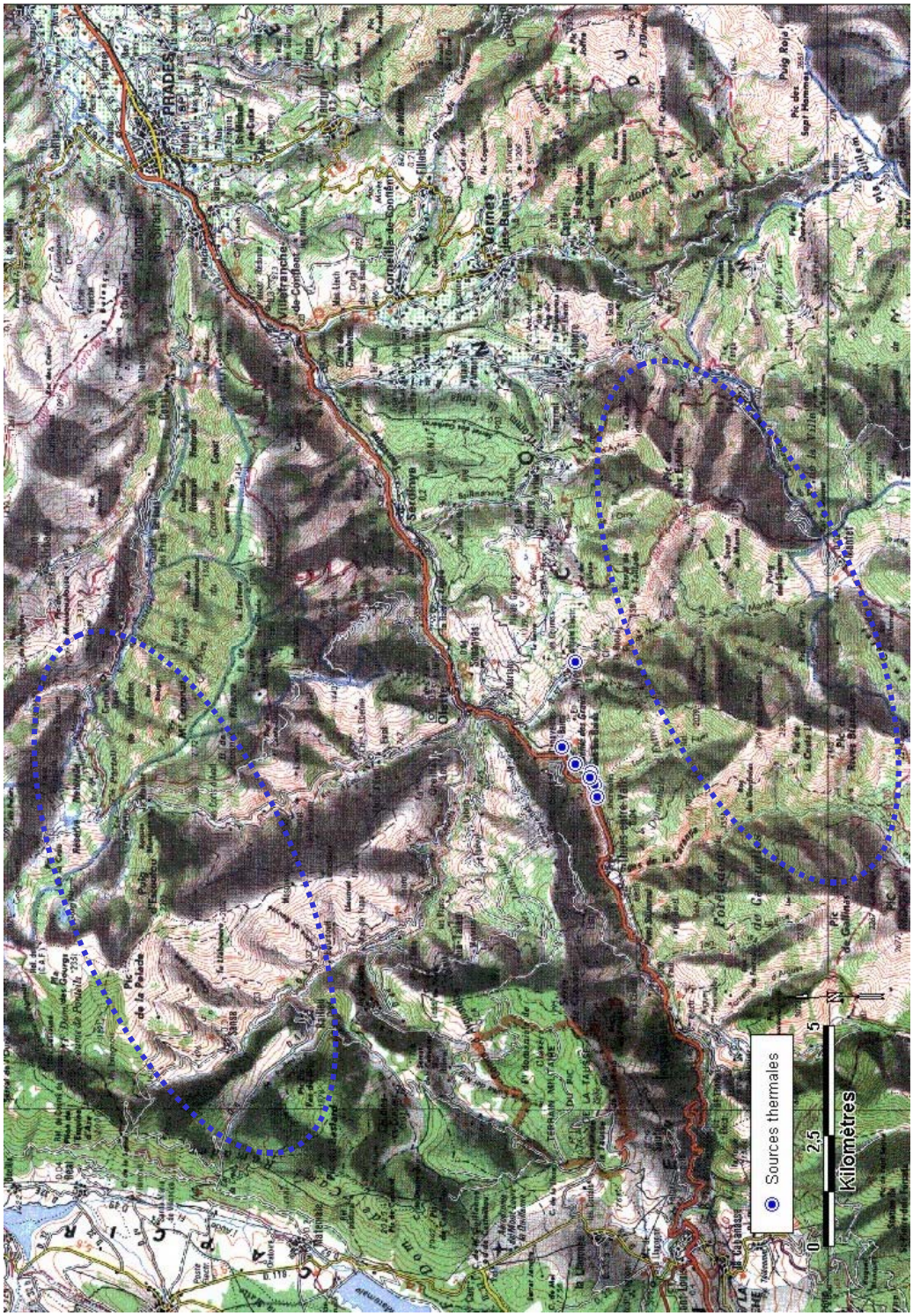


Illustration 55 – Aires de recharge potentielles des sources

b) Interprétation des résultats en tritium

La **source de Saint-André** affiche une teneur en tritium inférieure à 1 UT, ce qui permet d'affirmer qu'elle correspond à des eaux météoriques infiltrées avant 1952, ce qui suggère **un âge minimum de l'ordre de 50 ans**. Le temps de circulation entre l'infiltration des eaux météoriques et l'émergence est donc relativement long.

La source du Figuier présente des teneurs en tritium supérieures à 1 UT, ce qui ne permet pas de conclure quant à la date d'infiltration des eaux de pluies. En effet, en l'absence de données complémentaires, l'incertitude réside sur le fait que la présence de tritium soit due à une infiltration d'eaux de pluies postérieure à 1952 et/ou à un mélange (lors de la phase de remontée, et/ou à proximité de l'émergence) avec des eaux plus superficielles.

On peut toutefois se référer à la « recette » donnée par (Blavoux, 1995) pour l'interprétation des teneurs en tritium des eaux minérales en l'absence de longues chroniques de teneurs dans les pluies et les sources :

- si la teneur de l'eau minérale dépasse 25 UT, 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 UT, 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 UT, il s'agit d'un apport d'eau post-nucléaire dans une eau ancienne.

La **source du Figuier** se situe donc dans ce dernier cas de figure. Ceci est relativement concordant avec sa température (54°C) moins élevée que celle de la source de Saint-André (65°C). De par sa localisation sur la faille satellite de la Têt, il est possible que deux types d'eaux contribuent au débit à l'émergence :

- d'une part, des eaux infiltrées sur le versant nord du massif du Canigou (en, pendage vers le nord), qui ont atteint de grandes profondeurs sous la contrainte de la barrière imperméable constituée par les séries sédimentaires cambriennes de Canaveilles, et sont remontées à la faveur de la faille de la Têt (cf. Illustration 36). Elles pourraient constituer les « eaux anciennes » ;

- d'autre part, d'eaux infiltrées dans les bancs perméables de la série de Canaveilles (en pendage vers le sud), et qui regagnent la surface à la faveur de la faille satellite de la Têt, rencontrée à des profondeurs moindres que la faille de la Têt elle-même. Ces eaux seraient donc a priori moins chaudes, et plus « jeunes » que les précédentes.

Des mélanges avec des eaux superficielles ne sont également pas exclus, qui pourraient expliquer l'apport d'eaux plus « jeunes ».

4.4. ESTIMATION DES TEMPÉRATURES EN PROFONDEUR

4.4.1. Utilisation des géothermomètres chimiques

Les températures des sources à l'émergence sont une valeur minimale des températures du réservoir en profondeur, puisque, même si la remontée des eaux est supposée « rapide » comparativement à la phase de descente et de minéralisation (cf. § 1.2.1), des pertes de chaleur ont lieu lors de cette phase de remontée.

Pour estimer les températures des réservoirs en profondeur, des outils géochimiques ont été développés, qui sont basés sur l'étude des équilibres chimiques supposés avoir été atteints entre l'eau et la roche encaissante en profondeur, qui dépendent de la température du réservoir, et que l'on peut mettre en évidence au travers des rapports entre certains éléments chimiques caractéristiques de l'eau à l'émergence.

De nombreux géothermomètres chimiques ont ainsi été développés, pour des eaux situées dans différents contextes (eaux plus ou moins acides, plus ou moins concentrées en certains éléments, gammes de températures,…). Parmi les plus classiques sont à citer les géothermomètres à silice, à sodium-potassium, et à sodium-potassium-calcium :

<u>Géothermomètre à silice</u>

La solubilité de la silice (ou quartz) SiO_2 des minéraux des roches est fonction principalement de la température (à pH constant), et la réaction [1] est difficilement réversible pour une solution sursaturée.

$$\underset{(solide)}{SiO_2} + 2H_2O \rightarrow \underset{(dissoute)}{H_4SiO_4} \qquad [1]$$

Ceci implique que la concentration en silice des eaux thermales à l'émergence peut permettre d'accéder à la température minimale du réservoir en profondeur, moyennant deux hypothèses importantes :

- La concentration en silice est représentative de l'équilibre avec le quartz [1] dans le réservoir en profondeur,
- Il n'y a pas de changement dans la concentration durant la remontée rapide vers la surface par précipitation, dissolution, dilution, perte de vapeur, etc

<u>Géothermomètre Na/K (Sodium-Potassium)</u>

Il est basé sur l'équation d'équilibre suivante :

$$Na_{-feldspath} + K^+ \leftrightarrow K_{-feldspath} + Na^+ \qquad [2]$$

<u>Géothermomètre Na-K-Ca (Sodium-Potassium-Calcium)</u>

Il est basé sur l'équation d'équilibre suivante :

$$Ca_{1/3}Na_{2/3-feldspath} + K^{+} \leftrightarrow K_{-feldspath} + \frac{2}{3}Na^{+} + \frac{1}{6}Ca^{2+} \qquad [3]$$

Les équations et intervalles de températures de validité pour quelques uns de ces géothermomètres sont donnés dans le tableau ci-après (Serra et Sanjuan, 2003). Pour une même réaction d'équilibre, les équations peuvent différer selon les auteurs, ce qui dénote le caractère semi-empirique de ces méthodes (Illustration 56).

Géothermomètre	**Equation**	**Intervalle de T (°C)**	**Auteurs**
A quartz, sans perte de vapeur (en mg/l)	$T°C = \frac{1309}{5.19 - \log SiO_2} - 273.15$	0-250	(Fournier, 1977)
Quartz, perte de vapeur maximum à 100°C (en mg/l)	$T°C = \frac{1522}{5.75 - \log SiO_2} - 273.15$	0-250	(Fournier, 1977)
Na/K (en mg/l) albite ⇔ K-$_{feldspath}$	$T°C = \frac{855.6}{0.8573 + \log Na/K} - 273.15$	> 120	(Truesdell, 1975)
Na/K (en mg/l) albite ⇔ K-$_{feldspath}$	$T°C = \frac{1217}{1.483 + \log Na/K} - 273.15$	> 120	(Fournier, 1979)
Na-K-Ca (en mol/l) β = 4/3 si T < 100°C β = 1/3 si T > 100°C	$T°C = \frac{1647}{\log Na/K + \beta \log\sqrt{Ca}/Na + 2.24} - 273.15$	4-340	(Fournier et Truesdell, 1973)
Na-K-Ca (en mol/l)	$T = \frac{1416}{1.69 + \log\frac{Na^{+}}{K^{+}} + 0.055\log\frac{\sqrt{Ca^{2+}}}{Na^{+}}} - 273.15$	> 100	(Benjamin et al., 1983)

Illustration 56 – Equations géothermomètriques classiques

4.4.2. Quelques résultats sur les sources

Les températures des réservoirs en profondeur pour les 4 sources thermales du canton d'Olette analysées sont présentées sur les deux illustrations suivantes.

Ayant l'estimation de la température du réservoir en profondeur, une estimation est alors faite de la profondeur maximale atteinte, avec les deux hypothèses suivantes :

- le gradient géothermique moyen considéré est de +3°C/100m ;
- la température moyenne du lieu considéré est de l'ordre de 15°C.

La profondeur maximale atteinte est alors calculée ainsi : P_{max} (m) = (T_{max}–15°C)/3*100

Les résultats montrent une dispersion de l'ordre de 65°C, les températures estimées étant comprises entre 103 et 168°C. Avec les hypothèses énoncées précédemment, les profondeurs maximales estimées varient entre 2926 et un peu plus de 5000 m, contre 1300 à 2000m en se référant aux températures à l'émergence.

Ces résultats, quoique dispersés, suggèrent que les températures de réservoir dépassent les 100°C, ce qui correspondrait à une profondeur minimale de l'ordre de 2800m. Cette profondeur est très envisageable dans le contexte de la faille de la Têt, faille majeur d'ampleur régionale, et qui affecte la croûte continentale.

Source	**Figuier**		**Cascade**		**Saint-André**		**Des bains**	
Géothermomètre	**T (°C)**	**Prof. (m)**	**T (°C)**	**Prof. (m)**	**T (°C)**	**Prof. (m)**	**T (°C)**	**Prof. (m)**
A l'émergence	*54*	*1310*	*75*	*2007*	*65*	*1667*	*64*	*1633*
A quartz, pas de perte de vapeur (Fournier, 1977)	115	3346	127	3750	128	3771	126	3687
A quartz, perte de vapeur max à 100°C (Fournier, 1977)	114	3312	125	3656	125	3674	123	3603
Na/K albite-feldspath (Truesdell, 1975)	119	3475	107	3074	107	3070	103	2926
Na/K albite-feldspath (Fournier, 1979)	161	4852	150	4505	150	4501	146	4376
T°C Na-K-Ca (Fournier et Truesdell, 1973), avec β = 1/3	141	4208	144	4310	144	4308	142	4243
T°C Na-K-Ca (Benjamin et al., 1983), pour T > 100°C	165	4989	158	4755	158	4752	154	4645

Illustration 57 – Résultats de l'application de quelques géothermomètres sur les sources

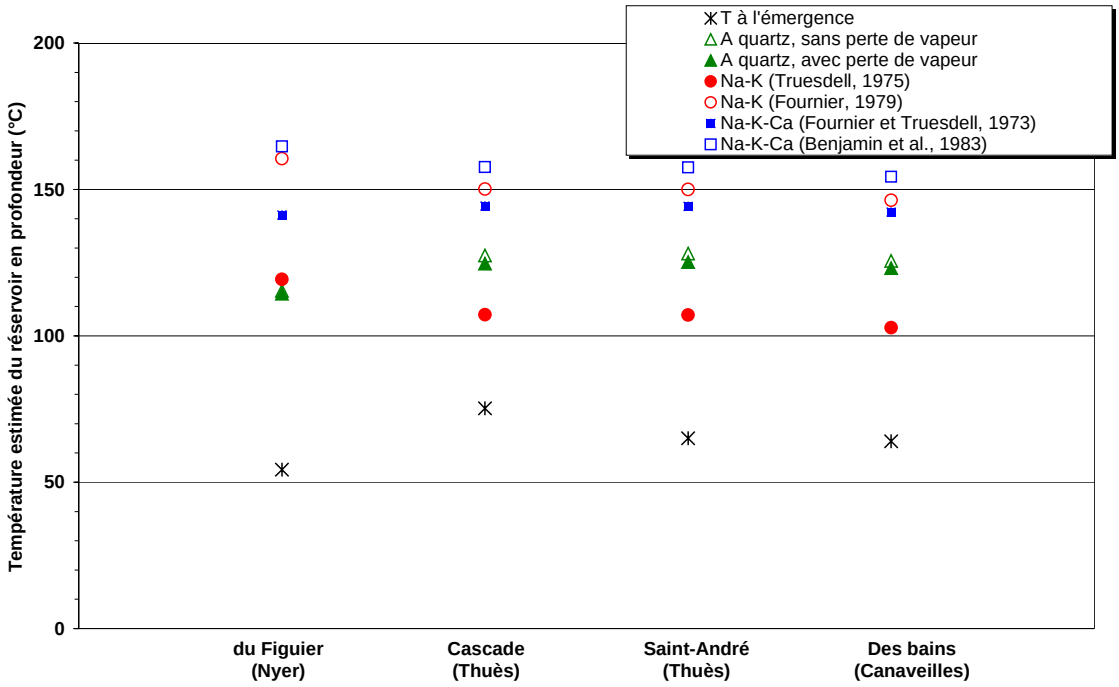


Illustration 58 – Températures estimées des réservoirs en profondeur en fonction de différents géothermomètres chimiques

4.5. CONCLUSIONS

Les analyses physico-chimiques pratiquées sur les quatre sources du Figuier, Cascade, Saint-André, et des bains de Canaveilles, ont fait apparaître de **grandes similitudes dans les profils géochimiques**, même si les températures d'émergence diffèrent (de 54°C à 75°C) :

- les conductivités mesurées in situ, de l'ordre de 300 µS/cm, indiquent une minéralisation peu marquée, conductivités que l'on retrouve également pour les eaux de Fontpédrouse, aux Bains de Saint-Thomas, ainsi qu'aux bains sauvages de Prats Balaguer ;

- les sources présentent le même faciès carbonaté sodique, avec des teneurs marquées en fluorures, lithium et strontium ;

- du point de vue de la qualité chimique évaluée au travers des éléments analysés dans le cadre de cette étude, ces sources sont quasi conformes aux deux normes de qualité concernant les eaux destinées à la consommation humaine, et les eaux minérales naturelles. Seules les normes en fluorures sont dépassées, ainsi que la norme imposée pour arsenic pour la seule source du Figuier ;

- enfin, l'application de quelques géothermomètres chimiques a donné une estimation de la température en profondeur de 100°C minimum, ce qui correspond,

avec l'hypothèse d'un gradient géothermique moyen de +3°C/100m, à une profondeur minimale atteinte de l'ordre de 2800m.

Les analyses isotopiques pratiquées sur les sources de Saint-André et du Figuier ont permis d'estimer l'altitude de l'aire d'infiltration aux environs de 2100 m (ce qui la situe en contexte montagneux, donc quasi exempt de facteurs potentiels de pollution), et le temps de transit entre l'infiltration et l'émergence à 50 ans minimum. Ces deux aspects militent pour une **protection naturelle du gisement**.

5. Contextes hydrogéologique et environnemental des sources

5.1. OBJECTIFS

Il s'est agi de replacer la position relative de chaque émergence dans son contexte hydrogéologique et environnemental local, afin d'apprécier les risques de contamination de l'eau thermale, et de préciser les conditions naturelles de protection de la ressource.

Chaque émergence a ainsi été replacée dans son bassin versant de surface, pour évaluer dans ce périmètre les activités (humaines et agricoles, voies de communication, …) qui seraient des facteurs potentiels de pollution. Il s'agit bien là de risques de pollution du captage par des eaux superficielles, et non nécessairement de pollution de la ressource proprement dite, qui fait intervenir la notion de gisement d'eau minérale (cf. § 1.2.1). La protection naturelle du gisement peut être plus complexe à estimer. Elle dépend de plusieurs paramètres qu'il convient de considérer pour aller dans le sens d'une protection naturelle optimale (Lopoukhine, 1995) :

- l'aire d'infiltration, en position haute par rapport à l'émergence, qui peut être ou non exempte d'activités potentielles porteuses de pollutions. Pour une protection optimale de la ressource, il importe de la définir le plus exactement possible, de lui assurer une protection de type administratif, et d'y mener des actions de préservation de l'environnement naturel ;

- la zone de transit des eaux comprise entre l'aire d'infiltration et l'émergence ne peut pas être définie et circonscrite en soi, par contre c'est celle où en principe les eaux, en profondeur, sont les moins vulnérables ;

- dans la zone de remontée, l'eau minérale emprunte un chemin qui la rapproche rapidement de la surface, avec des possibilités de mélanges avec des eaux plus superficielles, et plus vulnérables. La zone d'émergence doit donc faire l'objet d'une protection renforcée.

5.2. CONTEXTES DES SITES

Le contexte environnemental des sources est globalement favorable, avec un contexte de montagne, et peu d'activités potentiellement polluantes :

- seules quelques activités agricoles sont à noter sur Canaveilles et Nyer ;

- petites communes avec peu d'habitants, et équipées de stations d'épuration.

Les facteurs de pollution potentiels des sources à noter sont :

- la proximité de la route RN116, avec son trafic important (voitures, poids lourds) ;

- la proximité de la rivière Têt, vecteur potentiel de pollutions de surface.

Les risques de pollution associés sont liés à la **vulnérabilité des captages**, vulnérabilité que l'on peut réduire :

- en établissant un périmètre sanitaire d'émergence autour du captage, duquel seront exclues les activités potentiellement polluantes (dépôts, activités agricoles,…) ;

- en captant la ressource non plus à l'émergence, mais par un forage effectué dans les règles de l'art, avec une bonne protection en tête pour éviter les intrusions d'eaux superficielles (cimentation,…). Ce point est d'autant plus important en contexte de zone inondable, comme dans les Graus de Canaveilles.

Concernant la **protection du gisement** en lui-même, le contexte environnemental est très favorable, puisque les aires d'alimentation présumées, dont les analyses isotopiques situent les altitudes vers 2100m, sont constituées par les reliefs montagneux, boisés, difficilement accessibles, et exempts d'activités potentiellement polluantes.

De plus, les circulations des eaux thermales sont profondes (au minimum de l'ordre de 2800 m, selon les estimations données par les géothermomètres chimiques), et lentes (50 ans minimum pour la source de Saint-André), ce qui est aussi un facteur de protection naturelle de la ressource.

6. Définition de zones favorables pour des reconnaissances complémentaires

Partant de la caractérisation du gisement qui a pu être abordée au travers de l'analyse des contextes géologiques et environnementaux, et de l'évaluation de la qualité des eaux qui a été menée dans le cadre de l'étude, une synthèse est proposée qui a pour objectif de définir des secteurs qui pourraient être ciblés comme « favorables » pour des reconnaissances complémentaires en vue d'identifier de nouvelles ressources d'eaux chaudes.

Pour chacune des trois communes de Thuès-entre-Valls, Canaveilles, et Nyer, les éléments qui ont conduit à considérer le secteur comme favorable sont présentés, ainsi que les travaux de reconnaissance qu'il serait recommandé d'entreprendre pour confirmer ou infirmer les hypothèses émises sur la seule base de cette présente étude. Dans la définition des secteurs favorables sont aussi prises en considération différentes contraintes, telles que les accès aux sites, et la présence de terrains à la fois disponibles et favorables à l'installation de projets de développement.

6.1. SECTEUR DE THUÈS-ENTRE-VALLS

6.1.1. Potentialités en eaux thermales

Le village de Thuès-entre-Valls, et la vallée alluviale de la Têt, depuis le pont Séjourné jusqu'au CTRRF de Thuès-les-Bains environ, sont situés dans le **caisson de la faille de la Têt**. Cette faille est bien marquée sur le terrain par les facettes structurales de pendage 45°Nord sur les flancs nord du massif du Canigou.

Les potentialités en eaux thermales du secteur sont directement liées à la situation sur ce caisson de faille, et elles sont déjà marquées in situ par des émergences d'eaux chaudes connues, et exploitées notamment au CTRRF de Thuès-les-Bains (sources dont les températures atteignent 75°C, pour un débit conséquent de l'ordre de 400 m^3/j, source de Saint-André).

Les potentialités sont a priori importantes, si l'on considère le réservoir constitué par le massif d'orthogneiss du Canigou, massif fracturé (volume d'eau potentiel) et mylonitisé aux abords de la faille (drain préférentiel de remontée des eaux chaudes), comme on a pu le constater en remontant les gorges de la Carança.

La présence des sources connues (sources de Thuès-les-Bains, bains sauvages des « basses calentes »), les suintements d'eaux chaudes en bordure de la RN116 indiqués par M. le Maire de Thuès-entre-Valls, et le fait que les travaux de terrassement effectués par le CTRRF de Thuès-les-Bains aux abords du centre pour la station d'épuration aient fait émerger des eaux chaudes, plaident en faveur de l'ampleur spatiale de la zone de remontée des eaux chaudes. Si un forage implanté

dans ce caisson de faille a toutes chances de permettre de capter des eaux chaudes, on peut dire a contrario que la difficulté principale sera d'en déterminer un emplacement précis pour optimiser le débit capté. En effet, l'idée est de pouvoir se rapprocher le plus possible du plan de faille. Dans ce secteur, il présente un pendage de 45° vers le Nord (Illustration 59). Avec une telle pente, et dans l'hypothèse d'un forage vertical, une distance au plan de faille de 100 m implique de traverser une épaisseur de l'ordre de 100 m, d'où l'importance d'une **implantation la plus proche possible du plan de faille**.

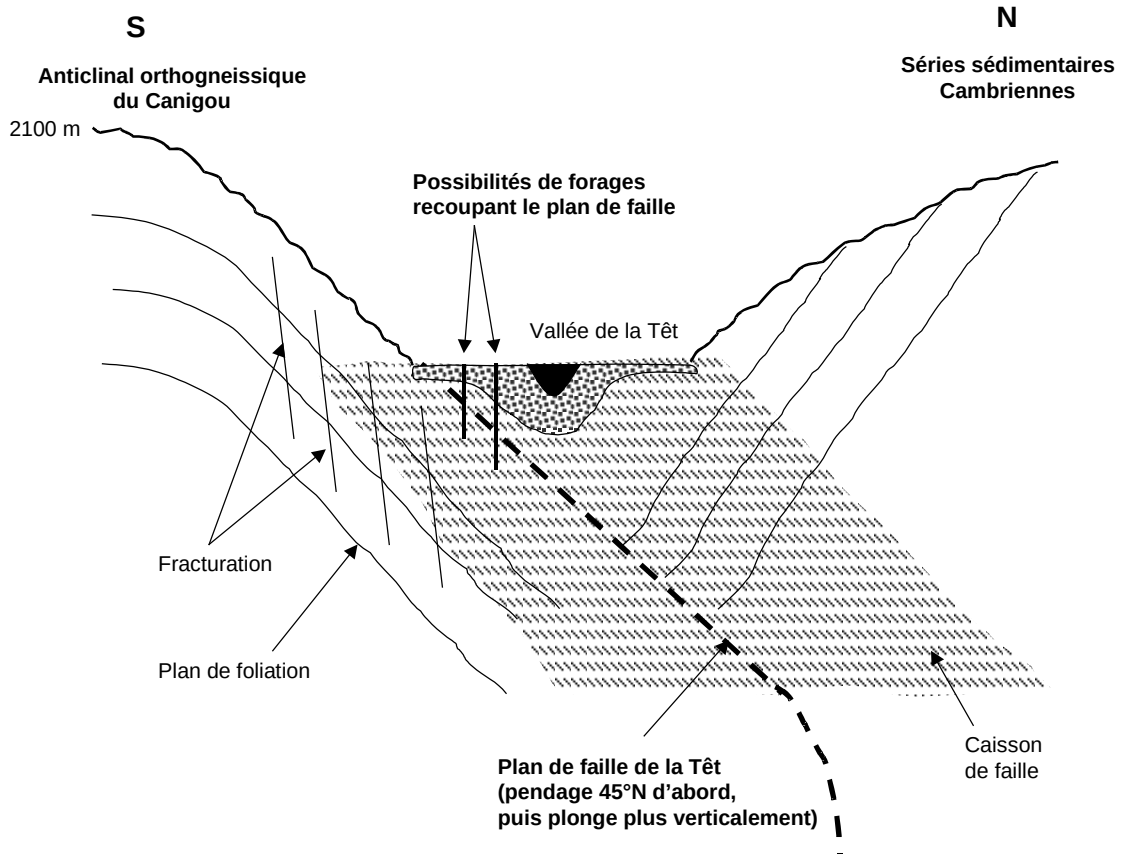


Illustration 59 – Implantation de forages dans la zone de Thuès-entre-Valls

6.1.2. Secteurs favorables

La mairie de Thuès-entre-Valls possède des terrains situés dans la plaine alluviale de la Têt. L'interprétation des photos aériennes a montré que ce secteur, situé dans le caisson de faille de la Têt, est encadré par la faille de la Têt et un linéament satellite parallèle (Illustration 60). La présence de ces éléments structuraux incline à penser que le secteur est au droit d'une zone mylonitisée favorable aux remontées d'eaux chaudes. JL Lenoble, dans une étude sur le secteur de Thuès-entre-Valls, avait par ailleurs donné un avis favorable pour un forage dans ce secteur (Lenoble, 2000).

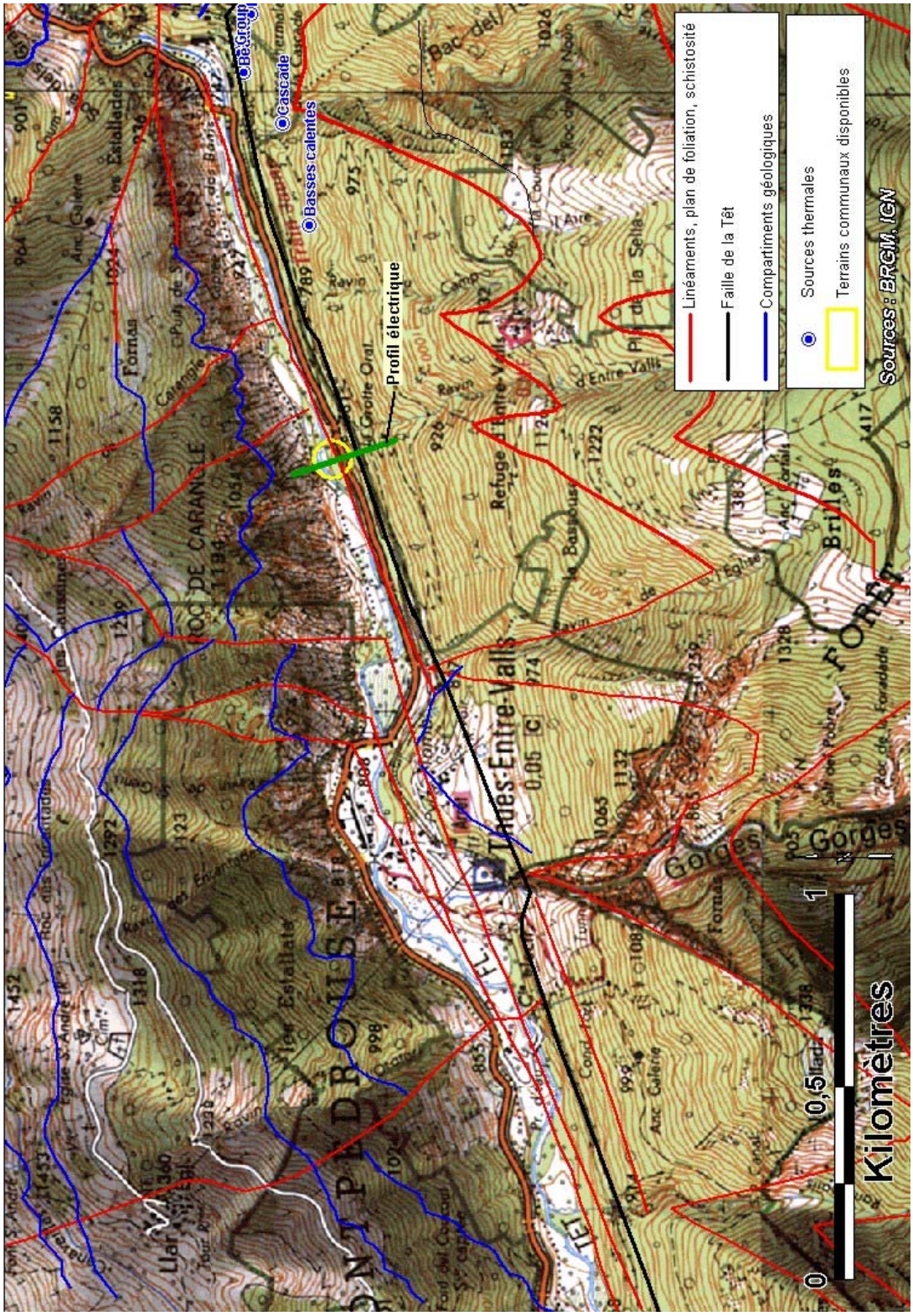


Illustration 60 – Définition de zones favorables, Thuès-entre-Valls

Des prospections géophysiques électriques pourraient contribuer au positionnement du forage : un profil électrique Nord-Sud au droit du secteur pourrait permettre de localiser la profondeur et le pendage local du plan de faille de la Têt.

Le site serait accessible pour les engins de forage (accès depuis la RN116).

De par la situation du terrain en zone alluviale, le forage devrait être isolé des eaux superficielles (eaux de ruissellement, et eaux de la nappe alluviale associée à la Têt) par une cimentation en tête sur une profondeur au moins égale à la couche d'alluvions.

Le terrain, situé en zone alluviale, est plat, et pourrait permettre l'installation d'infrastructures pour des projets de développement local (par exemple pour des projets d'élevage de poissons d'ornement et de consommation, cf. l'étude menée par le L.A.C.A., 2002).

6.2. SECTEUR DE CANAVEILLES

6.2.1. Potentialités en eaux thermales

Le secteur des gorges de la Têt (Graus de Canaveilles) est situé au droit de la faille satellite de la Têt liée à la virgation des séries paléozoïques (cf. Illustration 36). Les remontées d'eaux chaudes sont liées à cette faille satellite, et à la faille de la Têt même. La multitude des sources d'eau chaude recensées dans le secteur, dont la plus chaude affiche une température de 64°C, indique que le phénomène est de grande ampleur. Les potentialités en eaux thermales sont a priori importantes, au vu des massifs réservoirs qui peuvent être concernés : massif d'orthogneiss du Canigou au sud, et certaines séries (telles les calcaires et marbres fracturés, cf. Illustration 32) des séries cambriennes au nord.

Les émergences avérées sont localisées principalement en rive gauche de la Têt, dans la zone de virgation. C'est **dans cette zone très structurée qu'un forage aurait le plus de chances d'être productif**. Il faudra forer en direction du plan de faille de la Têt pour le traverser, tout en restant dans le plan de la faille satellite.

6.2.2. Secteurs favorables

La difficulté principale est liée à l'accès au site, très encaissé. Deux solutions peuvent être envisagées, dont les coûts devront être comparés :

- soit un forage en bordure de la Têt, au droit de l'ancien relais de l'Infante. Dans ce secteur, l'interprétation des photos aériennes fait apparaître une faille satellite. L'option d'un forage dans ce secteur impliquerait la remise en état de l'ancienne route d'accès au relais de l'Infante, pour le passage des engins de forage. C'est une solution qui pourrait être envisagée dans une optique de remise en valeur de l'ancien relais de l'Infante lui-même. Dans l'hypothèse d'un forage vertical, et compte tenu de la distance au plan de faille de la Têt de l'ordre de 300 m, recouper

le plan de faille de la Têt en pendage 45°N impliquerait un forage d'une profondeur de l'ordre de 300 m. Toutefois, il est possible que le forage fournisse le débit souhaité pour le projet de développement envisagé avant de recouper le plan de faille, donc pour des profondeurs moindres. Un profil électrique globalement nord-sud pourrait être envisagé le long de l'ancienne route d'accès au relais, afin de recouper le pan de la faille satellite. Situé en zone inondable, le forage serait à protéger des eaux superficielles par une cimentation en tête ;

- soit un forage réalisé depuis l'altitude de la route RN116, à proximité du tunnel, au droit des sources les plus amont (« Groupe amont »). L'interprétation des photos aériennes permet de situer un plan de faille satellite dans ce secteur, et le plan de faille de la Têt à 300m environ vers le sud (Illustration 61). Dans l'hypothèse d'un forage vertical, et en prenant en compte une dénivellée de l'ordre de 50 m entre la route et la Têt, recouper le plan de faille de la Têt en pendage 45°N impliquerait un forage d'une profondeur de l'ordre de 350 m. Toutefois, il est possible que le forage fournisse le débit souhaité pour le projet de développement envisagé avant de recouper le plan de faille, donc pour des profondeurs moindres.

La mairie de Canaveilles dispose de terrains en rive gauche de la Têt, à environ 700 m en aval des sources situées dans le défilé des Graus. Ces terrains, probablement inondables par fortes crues, demeurent peu accessibles mis à part l'accès par des chemins étroits (« Ancienne grande route dite de Montlouis », cf plan cadastral de la commune de Canaveilles). Relativement encaissés, ils semblent a priori peu propices à des activités de développement. De plus, ils sont situés à environ 1 km à vol d'oiseau du plan de faille de la Têt ce qui est rédhibitoire pour tenter un forage à proximité immédiate de ce site.

6.3. SECTEUR DE NYER

Le secteur de Nyer est divisé en deux parties assez distinctes, la zone de la source du Figuier, en rive droite de la Têt, et la zone à proximité de la centrale électrique, près du village.

6.3.1. Zone de la source du Figuier

a) Potentialités en eaux thermales

Le contexte est très semblable à celui des sources de Canaveilles. La source du Figuier est liée à la faille satellite de la Têt, orientée vers le nord dans ce secteur. Dans ce secteur, il faudrait forer en direction de la faille de la Têt pour la traverser tout en restant dans le plan de la faille satellite. A vol d'oiseau, la source du Figuier est située à environ 600 m du tracé de la faille en plan. Dans l'hypothèse d'un forage vertical, recouper le plan de faille de la Têt en pendage 45°N impliquerait un forage d'une profondeur de l'ordre de 600 m. Toutefois, il est possible que le forage fournisse le débit souhaité pour le projet de développement envisagé avant de recouper le plan de faille, donc pour des profondeurs moindres.

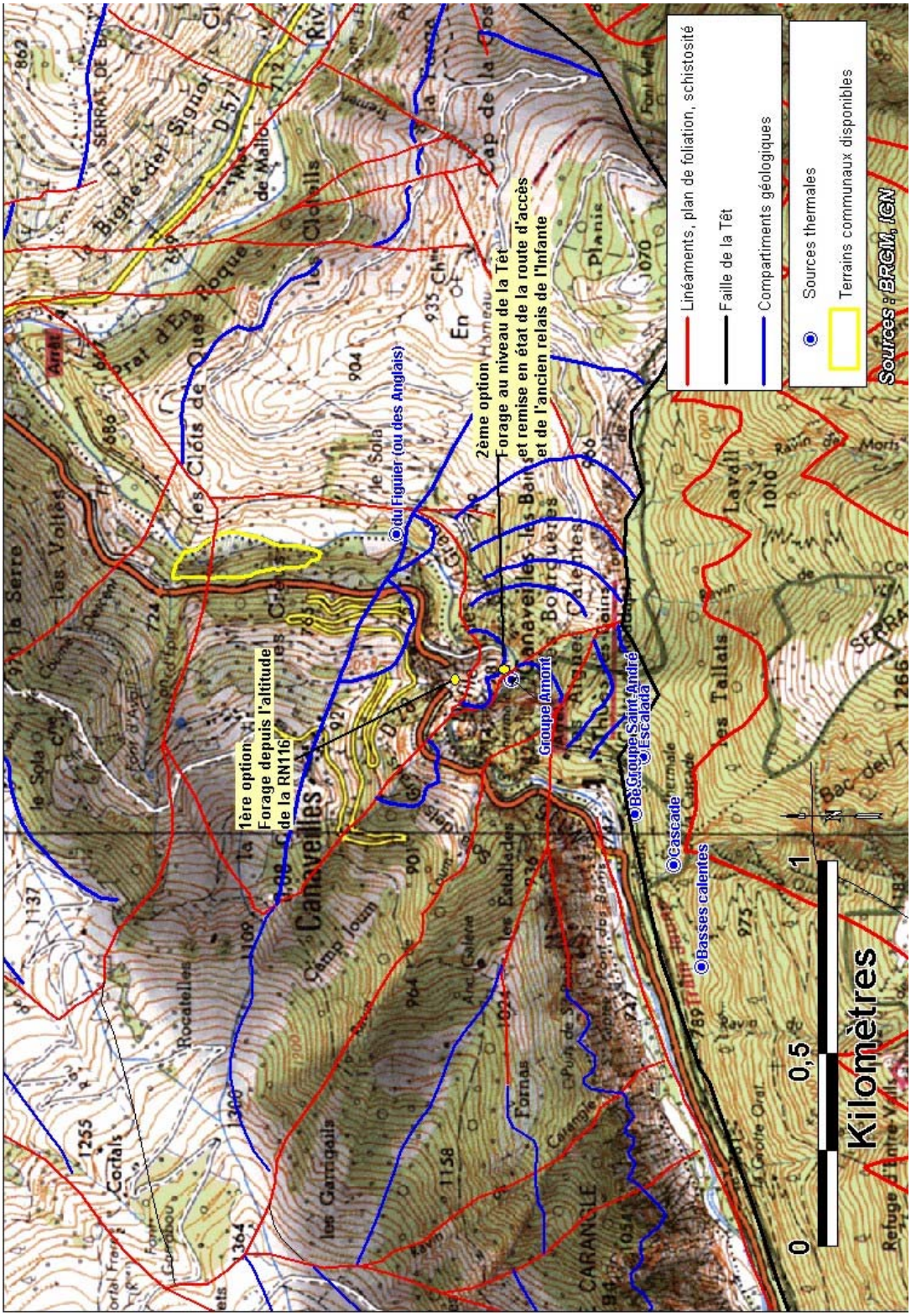


Illustration 61 - Définition de zones favorables, Canaveilles

Un profil électrique est-ouest pourrait être envisagé au niveau de la source pour recouper le plan de faille et contribuer au positionnement du forage.

b) Secteurs favorables

La difficulté principale est liée à l'accès au site, qui ne pourrait se faire que par la piste forestière au départ de Nyer. Le passage d'engins de forage nécessiterait des travaux sur cette piste, notamment pour couper certains lacets. L'accès serait sans doute limité au pont SNCF au droit de la source. Un forage pourrait être implanté à ce niveau, qui tenterait de recouper le plan de faille satellite identifié sur les photos aériennes (Illustration 62).

La commune de Nyer possède des terrains en aval de la source du Figuier, qui pourraient être mis à profit pour des projets de développement local. Le redressement de la piste pourrait être justifié dans ce cas. Un projet d'élevage de poissons d'ornement et de consommation a été étudié (L.A.C.A., 2002). L'ensoleillement des terrains sera à considérer dans l'étude de faisabilité d'un tel projet.

6.3.2. Secteur de Nyer village

a) Potentialités en eaux thermales

Les remontées d'eaux chaudes marquées par l'indice thermal situé sous la centrale électrique de Nyer sont liées à la faille de la Têt, cartographiée à proximité d'après l'interprétation des photos aériennes.

b) Secteurs favorables

Des possibilités de forage existent dans la zone faillée. Tout comme pour le secteur de Thuès-entre-Valls, l'objectif est de se placer le plus près possible du plan de faille pour minimiser la profondeur du forage, le pendage de 45°N impliquant la traversée d'environ 100 m de séries verticales par distance de 100 m à la faille.

Un profil électrique pourrait être envisagé au droit de la centrale électrique, pour recouper le plan de faille et contribuer à son positionnement sur le terrain.

La mairie de Nyer possède des terrains au-dessus de la centrale électrique, qui pourraient être alimentés en eau chaude à partir du forage proche, dans un projet d'hébergement touristique tirant partie des eaux chaudes (gîte, jacuzzi, récupération de chaleur). Un des projets envisagés est l'alimentation du château de Nyer en eaux thermales pour y développer une hôtellerie haut de gamme (10 chambres, 3 suites, avec jacuzzi, piscines,…). La relative proximité d'un forage pourrait permettre ce projet.

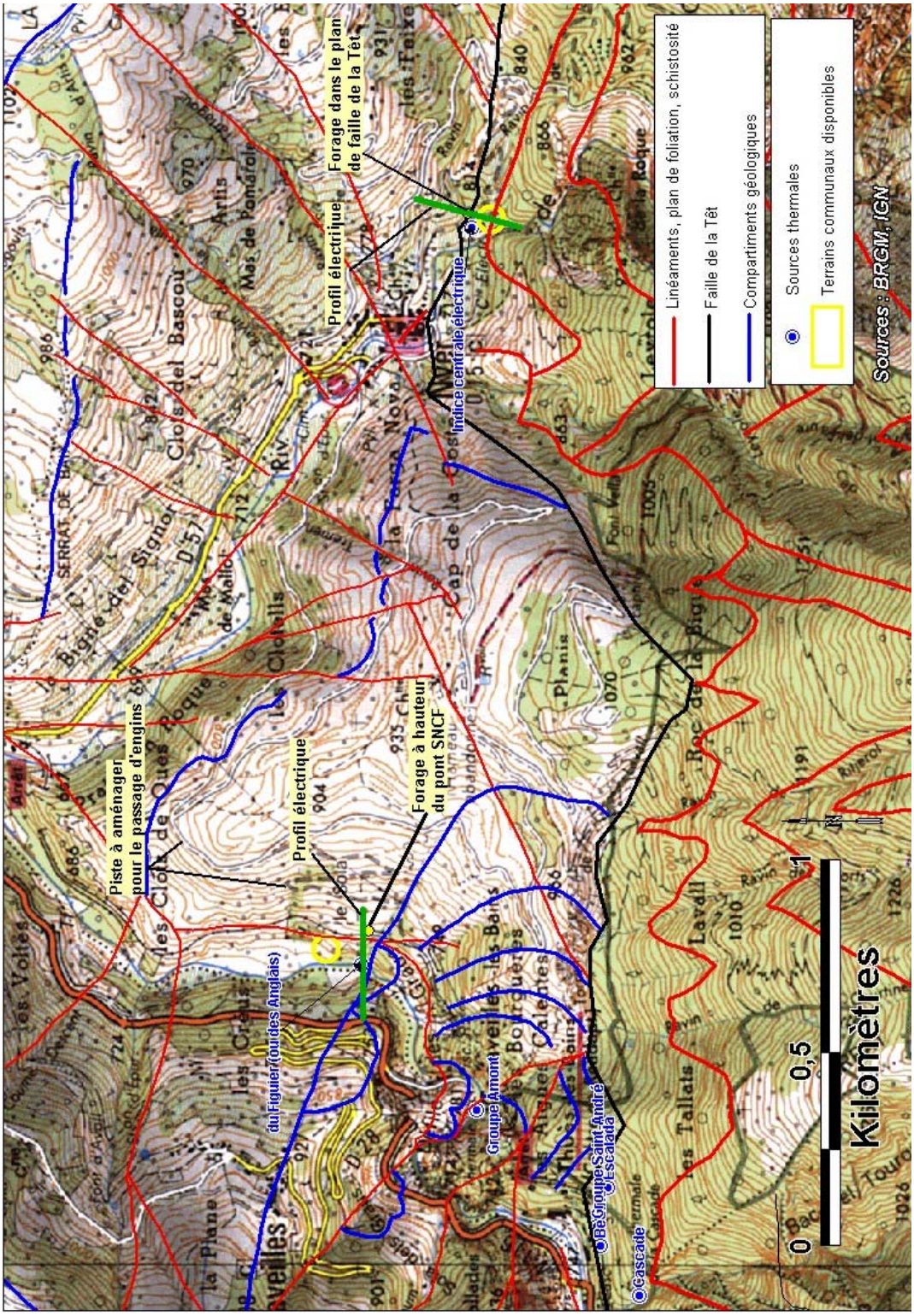


Illustration 62 - Définition de zones favorables, Nyer

6.4. REMARQUES SUR LES RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

Compte tenu des types de milieux géologiques rencontrés (roches présentant une bonne cohésion), la réalisation des **ouvrages de reconnaissance** doit pouvoir être entreprise par la technique destructive du MFT (Marteau Fond de Trou). Cette technique de forage présente de nombreux avantages :

- elle est relativement aisée à mettre en œuvre ;
- elle est rapide en terme d'exécution[14] ;
- parce qu'elle s'effectue sans adjonction de fluide extérieur, elle permet de juger rapidement de la présence ou non d'une eau présentant les caractéristiques physico-chimiques recherchées. La détermination du débit réellement exploitable nécessite cependant de réaliser des essais de pompage après la phase de foration, et ceci quelle que soit la technique de forage utilisée.

Des **prospections géophysiques électriques** apparaissent comme un préalable très conseillé à la mise en œuvre d'ouvrages de reconnaissance. Elles permettraient d'affiner la localisation des plans de faille, et par là d'aider à optimiser la profondeur des forages à entreprendre. Ces reconnaissances sont relativement aisées à mettre en œuvre sur le terrain, et ne nécessitent pas de matériel lourd (mise en place par deux personnes, matériel portatif.

[14] L'avancement de la foration dépend de nombreux paramètres : type de terrain, diamètre du forage, aléas techniques, etc. Seuls des ordres de grandeur peuvent être ici donnés a priori. Dans des terrains a priori durs comme ceux du Canton d'Olette, l'avancement moyen de la foration en méthode Marteau Fond de Trou pourrait être de l'ordre de 50 à 100 mètres par jour.

7. Conclusions et perspectives

Cette dernière partie synthétise les principaux résultats de cette étude, et replace les différents projets de développement qui pourraient être envisagés dans le contexte réglementaire et administratif associé.

7.1. DES EAUX THERMALES POUR DES PROJETS DE DÉVELOPPEMENT LOCAL

Le canton d'Olette est marqué par la présence de nombreuses sources d'eaux thermales, dont les températures s'échelonnent entre 40 et 75°C, et présentant un caractère sulfureux. L'analyse du contexte géologique des trois secteurs de Thuès-entre-Valls, Canaveilles, et Thuès-les-Bains, a montré que les sources thermales connues sont quelques indices bien marqués d'une **cellule hydrothermale d'ampleur régionale**, présentant les principales caractéristiques suivantes (cf. Illustration 36) :

- une zone d'infiltration (dont l'altitude a été estimée vers 2100 m), qui concerne, de part et d'autre de la faille de la Têt, l'anticlinal du Canigou au sud, et, dans une moindre mesure, une partie des séries sédimentaires cambriennes au nord ;

- un imposant massif réservoir constitué par les orthogneiss du Canigou, et certaines séries paléozoïques, que l'histoire messinienne, au Cénozoïque (III), a remaniés et structurés jusqu'à des profondeurs importantes (de l'ordre de –1000 mNGF au droit du massif du Canigou), permettant la descente et le séjour des eaux en profondeur, descente « contrainte » par la présence d'une barrière imperméable constituée par l'auréole métamorphique du massif ;

- la présence de réservoir en profondeur, où les eaux acquièrent leur température et leur minéralisation caractéristiques ;

- une zone de drain préférentiel constitué par la faille de la Têt et ses satellites, et la zone de roches mylonitiques associée. Cette faille d'ampleur régionale, datée tardi-hercynienne, qui se prolonge en profondeur jusqu'à la croûte continentale, permet la remontée relativement rapide des eaux chaudes jusqu'à la surface.

Les analyses physico-chimiques ont conforté le fait que cette cellule est d'ampleur régionale, et que **les sources, même si leurs températures d'émergence diffèrent, présentent la même origine** :

- les conductivités mesurées in situ, qui donnent un aperçu de la minéralisation globale des eaux, sont très semblables, de l'ordre de 300 µS/cm, ce qui dénote une minéralisation peu accentuée. On retrouve ces conductivités également pour les eaux de Fontpédrouse, aux Bains de Saint-Thomas, ainsi qu'aux bains sauvages de Prats Balaguer ;

- les analyses physico-chimiques effectuées sur 4 sources ont fait apparaître de fortes similitudes de profil géochimique :

    - les sources présentent le même faciès carbonaté sodique, avec des teneurs marquées en fluorures, lithium et strontium ;

    - L'application de quelques géothermomètres chimiques a donné une estimation de la température en profondeur de 100°C minimum, ce qui correspond, avec l'hypothèse d'un gradient géothermique moyen de +3°C/100m, à une profondeur minimale atteinte de l'ordre de 2800m.

Le gisement présente de très fortes potentialités. La source de Saint-André, au CTRRF de Thuès-les-Bains, avec un débit estimé de 400 m^3/j pour une température de 75°C en est un exemple marquant. Il est en outre doté d'une très bonne protection naturelle :

- son aire d'infiltration, dont l'altitude est estimée à 2100 m environ selon les analyses isotopiques, est située dans un contexte environnemental très favorable, quasi exempt d'activités potentiellement polluantes ;

- le temps de circulation, long (estimé à 50 ans minimum pour la source de Saint-André), est aussi un facteur de protection du gisement.

La vulnérabilité à considérer est celle, potentielle, des captages de la ressource qui seront envisagés. Des mesures seront à prendre pour limiter cette vulnérabilité :

- un périmètre de protection sera établi autour du point de prélèvement ;

- le contact des eaux thermales avec les eaux de surface (ruissellement, nappe alluviale, zone inondable) sera à éviter. Le captage par forage, avec cimentation en tête, permettra de limiter les risques.

Concernant l'usage des eaux chaudes envisagé, certaines **contraintes d'exploitation** seront à considérer :

- le **caractère thermal et sulfureux** des eaux implique des mesures spécifiques :

    - matériels adaptés, résistants à la corrosion ;

    - conditions d'exploitation (forage et transport) qui garantissent le maintien de la teneur en sulfures, si celle-ci est un facteur mis en avant dans le projet de développement concerné (thermoludisme par exemple) ;

    - la présence de soufre dans l'eau peut être un problème pour les projets d'élevages aquacoles (L.A.C.A., 2002). L'alternative pourrait être de ne récupérer que l'énergie des eaux thermales, et d'utiliser l'eau de la Têt pour les bassins d'élevage ;

- un des aspects de ces eaux thermales est le risque potentiel de présence d'**arsenic** en quantités importantes dans les eaux. La source du Figuier en présente une concentration de 31 µg/l (supérieure à la limite de 10 µg/l imposée à la fois par la norme de potabilité, et la norme sur les eaux minérales naturelles). Le CTRRF a dû abandonner ses projets de forages en bordure de la Têt pour assurer l'alimentation en eau douce du centre en raison de teneurs en arsenic de l'ordre de 30 µg/l sur ses forages de reconnaissance dont la profondeur était inférieure à 10 m.

A la fin de cette étude préliminaire sur les ressources en eaux chaudes, il semble que **les potentialités du gisement soient très importantes**. Pour les futurs projets de développement local, le point clé ne sera sans doute pas la ressource potentielle en elle-même, qui est présente. Les points clés seront sans doute :

- les conditions d'exploitation de la ressource (difficulté d'accès aux sites pour les engins de forage, difficultés d'acheminement si les projets sont éloignés des sites de production,…) d'une part ;

- les projets en eux-mêmes, qui devront être économiquement viables, et pour lesquels les différents maîtres d'ouvrage devront tenir compte de leur proximité pour éviter la mise en concurrence de projets similaires.

Une **hiérarchisation des projets** à réaliser pourrait être proposée ainsi, par ordre de priorité décroissante au regard principalement du contexte géologique et des contraintes de terrain :

1. D'abord la zone de Thuès-entre-Valls, qui paraît la plus facilement accessible, et pour laquelle la localisation sur le caisson de faille de la Têt plaide en faveur de forages positifs,

2. Puis la zone de Nyer village, localisée sur la faille cartographiée de la Têt, et sur laquelle existent des indices d'émergences d'eaux chaudes,

3. Enfin la zone des gorges de la Têt (Graus de Canaveilles et source du Figuier), présentant a priori de grandes potentialités et pour laquelle les indices d'émergence sont très marqués, mais aussi plus difficile d'accès, et pour laquelle les forages seraient a priori plus profonds.

Enfin, si les conditions de reconnaissance et d'exploitation de ressources nouvelles s'avéraient trop pesantes pour les communes, la suggestion pourrait être faite d'utiliser une partie des eaux de rejet du CTRRF de Thuès-les-Bains. En effet, sur les 3 groupes de sources actuellement utilisés par le centre (Escalada, Cascade, et Saint-André), seule la source de Saint-André est utilisée directement dans les piscines. Les autres sources ne sont utilisées que pour l'aspect énergétique. De plus, le débit des griffons n'est pas utilisé en totalité. Possibilité pourrait être suggérée d'utiliser ces eaux, en prenant en compte les points suivants :

- contrôle bactériologique des eaux en sortie du centre (piscines et circuits de chauffage) ;
- bilan énergétique (débit et température) des eaux de rejet ;
- estimation de la contribution du débit des sources au débit de la Têt, notamment en période d'étiage.

7.2. APERÇU DU CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET ADMINISTRATIF

Cette dernière partie donne un aperçu du contexte réglementaire et administratif à considérer en fonction des projets d'utilisation de l'eau thermale qui pourront être envisagés par le SIDECO : eau potable, eau minérale, géothermie, et plus généralement utilisation des eaux souterraines avec une information sur la réglementation en matière de forage. Ne seront données ici que les références et les grandes lignes des textes réglementaires concernés. Certains d'entre eux sont donnés en intégralité en annexe.

7.2.1. En matière d'eaux destinées à la consommation humaine

La qualité des eaux destinées à la consommation humaine est régie par le **Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001** « relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles ». L'annexe I de ce décret donne ainsi les limites et références de qualité pour ces eaux (texte donné en annexe 3).

7.2.2. En matière d'eaux minérales naturelles et de thermalisme

La réglementation « eau minérale » est contraignante pour l'obtention des autorisations d'exploiter à usage de thermalisme ou de l'embouteillage. L'annexe 5 présente les éléments qui constituent un **dossier de demande d'autorisation d'exploiter**. La procédure d'instruction est longue (3 ans minimum), elle aboutit à une autorisation ministérielle.

La directive européenne du 15 juillet 1980 (n°80/777) donne une définition de l'eau minérale naturelle, dont on peut résumer les principaux points comme suit :

L'eau minérale naturelle (« eau minérale » en appellation contractée) est une eau bactériologiquement saine, d'origine souterraine, tenue à l'abri de toutes pollutions, garantie par la protection naturelle du gisement. Elle possède des caractéristiques physico-chimiques (composition, température,…) et microbiologiques stables dans le cadre de fluctuations naturelles connues. En particulier, celles-ci ne doivent pas être modifiées par les variations éventuelles de débit d'exploitation.

Depuis l'arrêt de la cour européenne de justice du 17 juillet 1997, pour être reconnue « eau minérale naturelle », il n'est plus nécessaire qu'une eau, destinée à être embouteillée, ait des qualités favorables à la santé.

Les seuls traitements admis sont la sédimentation des matières en suspension, la séparation des composés instables tels que le fer et le manganèse, et une éventuelle adjonction ou élimination de gaz carbonique. Ces traitements physiques simples ont pour seul objectif de s'affranchir des phénomènes naturels qui se produiraient immanquablement dans une bouteille (précipitation, dépôts), et ne doivent pas modifier les caractéristiques essentielles de l'eau, notamment les caractéristiques microbiologiques.

L'eau minérale naturelle doit donc être naturellement saine pour être distribuée « telle que », sans les traitements curatifs dont peut bénéficier l'eau potable de distribution publique en cas de pollution, ce qui donne l'importance de la notion de protection du gisement

Pour être embouteillées, les eaux minérales naturelles doivent avoir bénéficié d'une autorisation d'exploitation en tant qu'eau minérale naturelle, et d'une autorisation ministérielle d'embouteillage.

La qualité des eaux minérales naturelles est régie par la **directive 2003/40/CE de la Commission du 16 mai 2003**, « fixant la liste, les limites de concentration et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source » (texte donné en annexe 4)

7.2.3. En matière de réglementation sur les forages

La réglementation nationale générale régie par le **Code Minier**, donne les prérogatives suivantes :

- tout forage effectué à une profondeur supérieure à 10 m doit être soumis à une déclaration de travaux à la DRIRE avant le début des travaux. De plus, les renseignements géologiques, hydrogéologiques et géotechniques doivent être communiquées au BRGM ;

- à partir d'une certaine profondeur (100m selon le Décret du 28/03/1978, sauf dispositions locales), les ouvrages sont soumis à autorisation, et la demande d'autorisation doit être faite auprès de la DRIRE.

Le **Code de l'Environnement** donne la nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités soumis à déclaration ou à autorisation :

- le **décret n°93-743 du 29 mars 1993** donne les critères suivants pour des prélèvements et réinjection d'eau en circonstances « normales » :

  - débit > 8 m^3/h et < 80 m^3/h, soumis à déclaration en préfecture ;

  - débit ≥ 80 m^3/h, soumis à autorisation en préfecture.

- plus récemment, l'**arrêté du 11/09/03** portant application du **décret 96-102 du 2/02/1996** a fixé les prescriptions générales applicables aux prélèvements soumis à déclaration.

7.2.4. En matière de géothermie

a) Les différents types de géothermie

La profondeur et la température du gisement sont les deux paramètres déterminants d'une exploitation géothermique. Selon la valeur de ces paramètres, quatre niveaux de classification sont définis, correspondant à des utilisations distinctes de la chaleur :

- la géothermie haute température (> 180°C) et moyenne température (entre 100°C et 180°C) sont réservées à la production d'électricité ;

- la géothermie basse température (entre 30°C et 100°C) est utilisée pour la production de chaleur (chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans l'industrie, le thermalisme, la balnéothérapie,…) ;

- la géothermie très basse température (< 30°C) est utilisée pour le chauffage ou la climatisation de locaux après élévation de la température au moyen de pompe à chaleur.

b) Les textes de référence

Les textes réglementaires relatifs à la géothermie pour le chauffage ou la production d'électricité relèvent, en base, du **Code Minier**.

Par contre et en ce qui concerne la réalisation de forages alimentant des pompes à chaleur (géothermie très basse énergie), la réglementation relève du **Code de l'Environnement** :

- le **décret n°93-743 du 29 mars 1993** modifié stipule la nécessité d'une demande d'autorisation en préfecture pour les ouvrages, travaux et activités liées à la recherche et l'exploitation d'eau pour gîtes géothermiques ;

- l'**arrêté du 11/09/03** portant application du **décret 96-102 du 2/02/1996** a fixé les prescriptions générales applicables aux prélèvements soumis à déclaration.

Bibliographie

Amble-Consultants (2001) – La valorisation du Canton d'Olette et de ses eaux chaudes.

AME (2003) – La lettre du Projet de Parc Naturel Régionale des Pyrénées Catalanes, Cerdagne, Capcir, Haut-Conflent, n°5, avril 2003.

Anglada J. (1832) – Traité des eaux minérales et des Etablissements thermaux du département des Pyrénées Orientales. Chap. V Des eaux sulfureuses de Saint-Thomas, de Canaveilles, et de Nyer.

Annales des Mines (1998) - Réalités industrielles. Les eaux minérales naturelles. L'inventaire complet des sources en France.

Autran A. (2004) Communications Orales, dans le cadre du levé des cartes Géol. France (1/50 000), feuille de Céret (1096), feuille Argelès-sur-mer (1097).

Barnolas A., Chiron J.C. (1996) – Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Vol. 1. Introduction. Géophysique. Cycle hercynien. Editions BRGM-ITGE. 2 vol.

Benjamin T., Charles R., Vidale R. (1983) - Thermodynamic parameters and experimental data for the Na-K-Ca geothermometer. *Jour. of Volcano. and Geotherm. Research* 15, p.167-186.

Bérard P., Eulry M., Teissier J.L. (1987) – Ville de Fontpédrouse, Thermes de Saint-Thomas-les-Bains, Projet de réactivation de la station, Etude du contexte géologique, réalisation d'un forage de reconnaissance. Rapport BRGM/87 SGN 232 LRO.

Billa M. (1980) – Contribution à l'étude des minéralisations fluorées des Pyrénées Orientales : Mas Pachette (Albères), bordure orientale du Canigou. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.

Blavoux B. (1995) - Apports des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale. *La Houille Blanche*, n°2/3, p. 51-58.

Bousquet J.C., (1997) – Géologie du Languedoc-Roussillon*. Les Presses du Languedoc & Editions du BRGM*. 142 p. Septembre 1997.

Calvet M. (1996) – Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne, Les Pyrénées Orientales. Thèse de Doctorat d'Etat ès lettres de l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, soutenue en 1994. *Presses universitaires de Perpignan & Editions du BRGM. Documents du BRGM 255*.

Canals L., Canals E., Pons J. (1928) – Thuès-les-Bains, notice scientifique.

Canellas J. (1995) - Au sujet de la définition et de la réglementation des eaux minérales naturelles. *La Houille Blanche*, n°2/3, p. 32-36.

Chabart M. (1996) – La recharge de l'aquifère multi-couche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées Orientales). Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, soutenue en 1995. Editions BRGM. Documents BRGM 257.

Choukroune P; Garrido A; Daigneres M., et al. (1988) - The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees. *Nature (London)*, vol.331, no.6156, p.508-511.

Clauzon G. (1990) – Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques*. Paléobiologie continentale, Montpellier, XVII*, 1990, pp. 125-155.

Clauzon G., Rubino, J-L. (2001) – La crise de salinité messinienne et les Gilbert Deltas pliocènes marqueurs de l'évolution géodynamique du Roussillon et du Conflent. Livret-guide d'excursion, 8-9 septembre 2001. GDR Marges, Atelier Messinien, Perpignan 7-10 septembre 2001. 25 p.

Courtois N., avec la collaboration de **Le Strat P. et Marchal J.P.** (2001) - Synthèse hydrogéologique de la vallée de la Têt (Pyrénées Orientales). Rapport BRGM/RP-51321-FR, 51 p.

Craig H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, pp. 1702-1703.

Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales (1995 à 2000) - Mémento technique des eaux minérales. Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications.

Dolques J., Vigouroux Ph. (2003) - Les eaux thermo-minérales. Suivi de la ressource et objectifs de protection. *La Houille Blanche*, n°3, p. 34-37.

Duvail C., Le Strat P. (2000) – Évolution géodynamique du bassin du Roussillon : Analyse des profils sismiques calibrés par des sondages profonds de Elne1 et de Canet1. Rapport GEO-TERRE : GTR/BRGM/12000-137. 23 p.

Duvail C., Gorini C., Lofi J, *et al*. (2004, accepted) - Pliocene-quaternary correlations between onshore and offshore domains at the Roussillon Basin level (eastern Pyrenees, France). Marine and Petroleum Geology.

erdyn consultants (2001) – SIDECO, Etude de valorisation des sources d'eaux chaudes dans le Canton d'Olette, Proposition.

Fouillac C. (1983) - Chemical geothermometry in CO_2-rich thermal waters. Example of the French Massif Central. *Geothermics*, vol 12, n°2/3, p. 149-160.

Fouillac C., Fouillac A.M. (1989) - Etude chimique et isotopique des sources minérales de l'Ardèche. *Hydrogéologie*, n°3, pp. 229-239.

Fournier R.O., Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim*. *Acta* 37, p.1255-1275.

Fournier R.O. (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics* 5, p.41-50.

Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geotherm. Res. Counc. Trans. 3*, p.221-224.

Gadalia A. (1995) - Chimie de la minéralisation. *La Houille Blanche*, n°2/3, p. 62-69.

Guitard G., Laumonier B., Autran A., *et al.* (1998) – Notice explicative de la feuille de Prades au 1/50000ème (carte géologique n°1095).

Journal Officiel de la République Française du 22/12/2001 (2001) - Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles.

Journal Officiel de l'Union Européenne L126/34 du 22/05/2003 (2003) - Directive 2003/40/CE de la Commission Européenne fixant la liste, les limites de concentrations, et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source.

L.A.C.A. (2001-2002) – Valorisation des sources d'eaux chaudes du Canton d'Olette, Poissons d'ornement, poissons de consommation. Rapport de stage de Licence Professionnelle en Aquaculture Continentale et Aquariologie de l'I.U.T. de Nancy sous la direction de P. Fontaine.

Lenoble J.L. (2000) – Valorisation des sources d'eau chaudes dans la vallée de la Têt, Phase I : Analyse des lieux de l'existant, Rapport de synthèse hydrogéologique.

Le Strat P., Duvail C., Clauzon G. (2001) - Présentation des travaux de cartographie du BRGM en Roussillon depuis 1996. *In "GDR marges" atelier "Messinien dans le Golfe du Lion" Perpignan, 7-10 septembre 2001*.

Le Strat P., Duvail C., Lofi J., et al. (2003) – Pliocene-Quaternary correlations between onshore and offshore domains at the Roussillon basin level (Pyrénées Orientales – Fance). *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France, April 2003*.

Lopoukhine M. (1995) - La protection des ressources en eau minérale : éléments de réflexion. *La Houille Blanche*, n°2/3, p. 73-76.

Maurel O., Brunel M., Monié P. (2002) - Exhumation cenozoique des massifs du Canigou et de Mont-Louis (Pyrenees orientales, France). Cenozoic exhumation of

Canigou and Mount Louis massifs, eastern Pyrenees, France. *C.R.A.S. Geoscience*, vol.334, no.12, p.941-948.

Michard G., Fouillac C., Evrad M., *et al*. (1978) - Acquisition des ions alcalino-terreux par les eaux thermales carbo-gazeuses. *Earth and Planetary Science Letters*, 41(1978), p. 170-174.

Pouchan, P. (1995) - L'émergence thermominérale. *La Houille Blanche*, n°2/3, p. 46-50.

Raymahashay B.C. (1996) - Geochemistry for hydrologists. Eds. Techip. 190 p.

Rosenstein J.M. (1997) – Les bains de Saint-Thomas.

Rosenstein J.M., Barnades G. (1998) – Graus de Canavelles, Oleta, Toès, Stations Thermales d'Antan. *Revista Terra Nostra*, n°97.

Serra H., Sanjuan B. (2003) – Synthèse bibliographique des géothermomètres chimiques. Rapport BRGM/RP-52430-FR.

Souquet P., Mediavilla F (1976) - Nouvelle hypothèse sur la formation des Pyrénées. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D: Sciences Naturelles*, vol.282, no.24, p.2139-2142.

Souquet P., Peybernes B., Bilotte M., *et al*. (1977) - La Chaîne Alpine des Pyrénées. *Géologie Alpine*, vol.53, no.2, p.193-216.

Souriau A., Granet M. (1995) - A tomographic study of the lithosphere beneath the Pyrenees from local and teleseismic data. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*, vol.100, no.9, p.18,117-18,134.

Truesdell A.H. (1975) – Summary of Section III. Geochemical techniques in exploration. *Proc. Second United Nations Symposium on the development and use of Geothermal Resources 1*, p.liii-lxiii.

Velard F. (1979) – Modèles simples de comportement d'une source d'eau chaude. Essai d'application aux sources thermales de la haute vallée de la Têt (Pyrénées-Orientales). Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

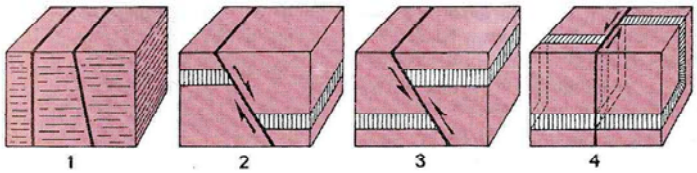
Glossaire

Charriage : Chevauchement de grande amplitude (de la dizaine à la centaine de kilomètres, et au-delà).

Chevauchement : (1) Mouvement tectonique conduisant un ensemble de terrains à en recouvrir un autre par l'intermédiaire d'un contact anormal peu incliné (surface de chevauchement). (2) Recouvrement résultant de ce mouvement.

Faille : Cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées.

1 : failles verticale et oblique, 2 : faille normale, 3 : faille inverse, 4 : décrochement.

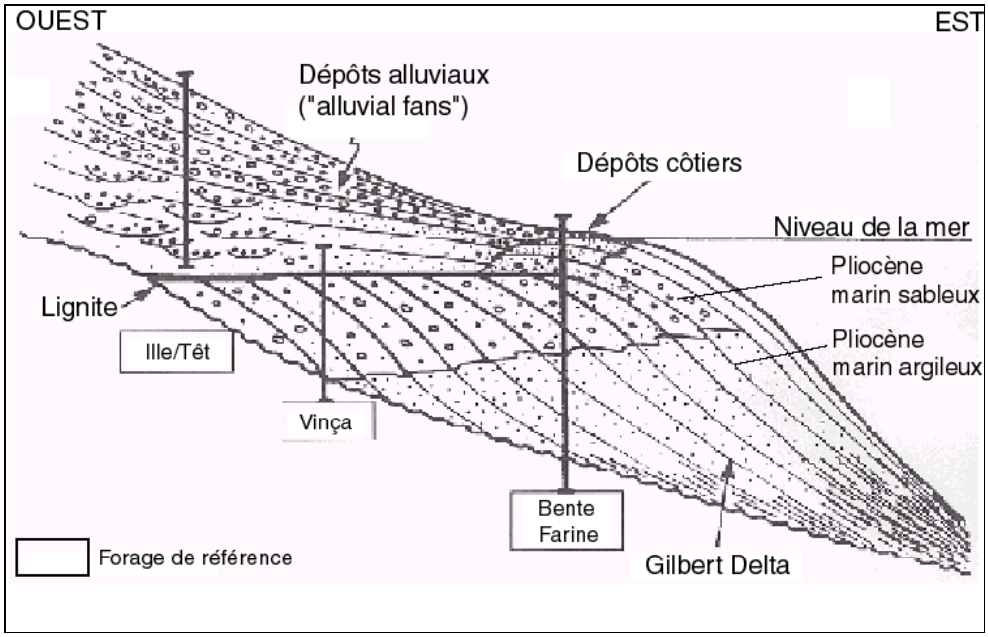


(D'après Foucault A., Raoult J.F. (2000) - Dictionnaire de géologie, Eds. Dunod)

Foliation : Structure des roches dont les minéraux sont arrangés ou aplatis selon des plans parallèles.

Fracturation : Terme général désignant toute cassure avec ou sans rejet, de terrain, de roches, voire de minéraux.

Gilbert delta : Modèle de remplissage sédimentaire. La figure ci-dessous présente l'exemple du modèle génétique de Gilbert delta pour le Roussillon (Clauzon, 2000).



Gneiss : Roche métamorphique très commune.

Granite : Roche magmatique plutonique très commune, formant la plus grande partie de l'écorce des continents.

Granitoïdes : Terme désignant l'ensemble des granites, des granites monzonitiques, et des granodiorites.

Magmatiques (roches) : Roches résultant de la cristallisation d'un magma, elles sont représentées principalement par les granites d'une part (roches magmatiques plutoniques) et les basaltes d'autre part (roches magmatiques volcaniques).

Méta- : Placé devant un nom de roche, il indique que celle ci a été métamorphisée (un métabasalte désigne toute roche métamorphique dérivant d'un basalte).

Métamorphisme : Transformation d'une roche à l'état solide du fait de l'élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux, et acquisition de textures et structures particulières.

Migmatite : Ensemble qui, à l'échelle de l'affleurement et non du petit échantillon isolé, est un mélange de roches de types granite et gneiss.

Mylonite : Roche broyée plus ou moins finement, liée à la mise en place de faille.

Olistolithe : Gros bloc appartenant à une masse glissée.

Ortho- : Placé devant un nom de roche, il indique que cette roche était d'origine magmatique (un orthogneiss dérivera d'un granite).

Para- : Placé devant un nom de roche, il indique que la roche originelle était sédimentaire (un paragneiss dérivera d'un grès arkosique).

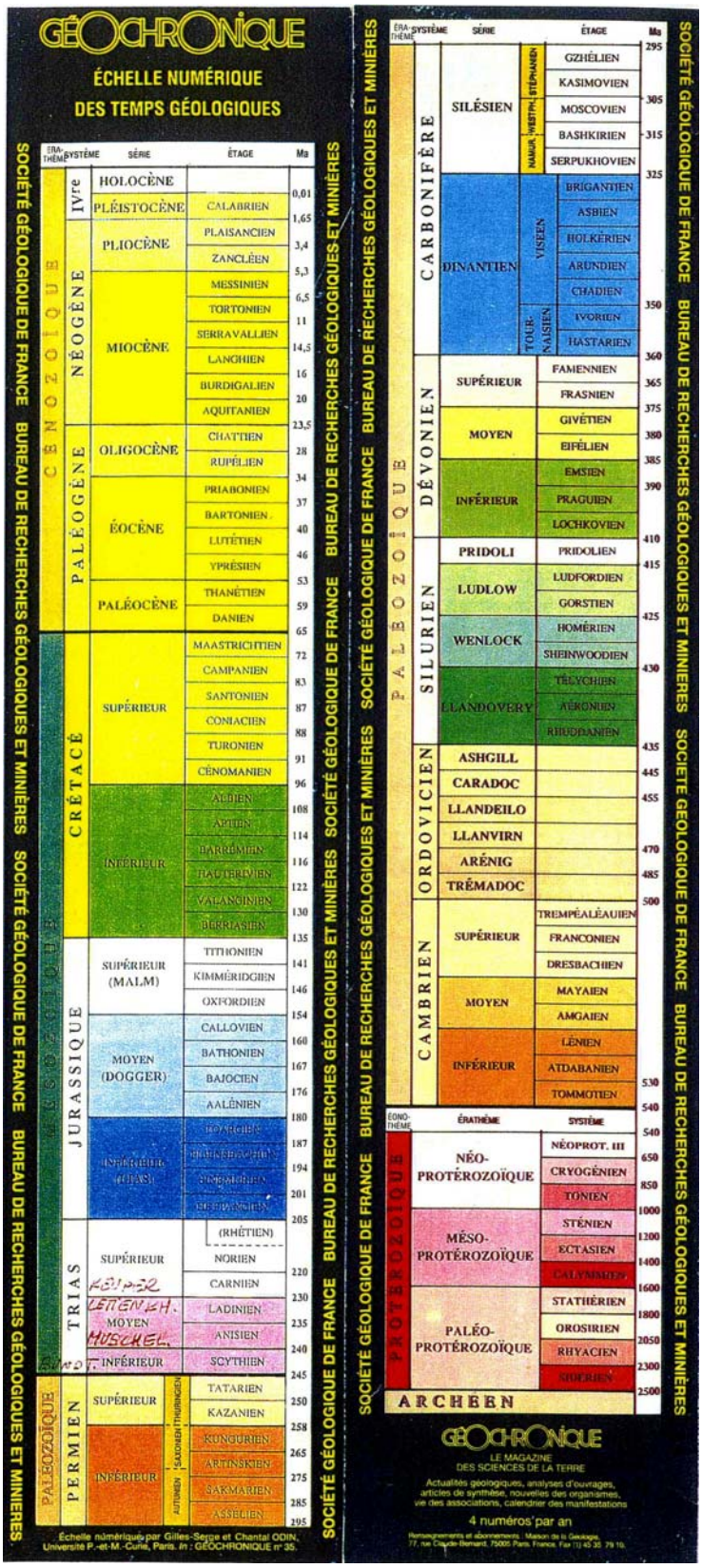
Plutoniques (roches) : Les roches plutoniques sont formées par cristallisation lente d'un magma à une certaine profondeur, et sont généralement grenues, et homogènes dans de grands volumes (ex. granites).

Schiste : Roche ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques.

Schistosité : Feuilletage plus ou moins serré présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames plus ou moins épaisses et régulières.

Sédimentaires (roches) : Roches exogènes, c'est à dire formées à la surface de la Terre, et qui représentent en volume environ 5% de la croûte terrestre (continentale et océanique), et en couvrent 75% de la surface.

Temps géologiques : L'échelle des temps géologiques est donnée ci-après.


GÉOCHRONIQUE
ÉCHELLE NUMÉRIQUE
DES TEMPS GÉOLOGIQUES
ÉRA-THÈME
SYSTÈME
SÉRIE
ÉTAGE
Ma
CÉNOZOÏQUE
IVre
HOLOCÈNE
PLÉISTOCÈNE
CALABRIEN
PLIOCÈNE
PLAISANCIEN
ZANCLÉEN
NÉOGÈNE
MIOCÈNE
MESSINIEN
TORTONIEN
SERRAVALLIEN
LANGHIEN
BURDIGALIEN
AQUITANIEN
PALÉOGÈNE
OLIGOCÈNE
CHATTIEN
RUPÉLIEN
ÉOCÈNE
PRIABONIEN
BARTONIEN
LUTÉTIEN
YPRÉSIEN
PALÉOCÈNE
THANÉTIEN
DANIEN
MÉSOZOÏQUE
CRÉTACÉ
SUPÉRIEUR
MAASTRICHTIEN
CAMPANIEN
SANTONIEN
CONIACIEN
TURONIEN
CÉNOMANIEN
INFÉRIEUR
ALBIEN
APTIEN
BARRÉMIEN
HAUTERIVIEN
VALANGINIEN
BERRIASIEN
JURASSIQUE
SUPÉRIEUR (MALM)
TITHONIEN
KIMMÉRIDGIEN
OXFORDIEN
MOYEN (DOGGER)
CALLOVIEN
BATHONIEN
BAJOCIEN
AALÉNIEN
INFÉRIEUR (LIAS)
TOARCIEN
PLIENSBACHIEN
SINÉMURIEN
HETTANGIEN
TRIAS
SUPÉRIEUR
(RHÉTIEN)
NORIEN
CARNIEN
MOYEN
LADINIEN
ANISIEN
INFÉRIEUR
SCYTHIEN
PALÉOZOÏQUE
PERMIEN
SUPÉRIEUR
TATARIEN
KAZANIEN
INFÉRIEUR
KUNGURIEN
ARTINSKIEN
SAKMARIEN
ASSÉLIEN
SAXONIEN
THURINGIEN
AUTUNIEN
Échelle numérique par Gilles-Serge et Chantal ODIN, Université P.-et-M.-Curie, Paris. In : GÉOCHRONIQUE n° 35.
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
ÉRA-THÈME
SYSTÈME
SÉRIE
ÉTAGE
Ma
PALÉOZOÏQUE
CARBONIFÈRE
SILÉSIEN
NAMUR.
WESTPH.
STÉPHANIEN
GZHÉLIEN
KASIMOVIEN
MOSCOVIEN
BASHKIRIEN
SERPUKHOVIEN
DINANTIEN
VISÉEN
BRIGANTIEN
ASBIEN
HOLKÉRIEN
ARUNDIEN
CHADIEN
TOUR-NAISIEN
IVORIEN
HASTARIEN
DÉVONIEN
SUPÉRIEUR
FAMENNIEN
FRASNIEN
MOYEN
GIVÉTIEN
EIFÉLIEN
INFÉRIEUR
EMSIEN
PRAGUIEN
LOCHKOVIEN
SILURIEN
PRIDOLI
PRIDOLIEN
LUDLOW
LUDFORDIEN
GORSTIEN
WENLOCK
HOMÉRIEN
SHEINWOODIEN
LLANDOVERY
TÉLYCHIEN
AÉRONIEN
RHUDDANIEN
ORDOVICIEN
ASHGILL
CARADOC
LLANDEILO
LLANVIRN
ARÉNIG
TRÉMADOC
CAMBRIEN
SUPÉRIEUR
TREMPÉALÉAUIEN
FRANCONIEN
DRESBACHIEN
MOYEN
MAYAIEN
AMGAIEN
INFÉRIEUR
LÉNIEN
ATDABANIEN
TOMMOTIEN
EONO-THÈME
ÉRATHÈME
SYSTÈME
PROTÉROZOÏQUE
NÉO-PROTÉROZOÏQUE
NÉOPROT. III
CRYOGÉNIEN
TONIEN
MÉSO-PROTÉROZOÏQUE
STÉNIEN
ECTASIEN
CALYMMIEN
PALÉO-PROTÉROZOÏQUE
STATHÉRIEN
OROSIRIEN
RHYACIEN
SIDÉRIEN
ARCHÉEN
GÉOCHRONIQUE
LE MAGAZINE
DES SCIENCES DE LA TERRE
Actualités géologiques, analyses d'ouvrages, articles de synthèse, nouvelles des organismes, vie des associations, calendrier des manifestations
4 numéros par an

Virgation : Ensemble de plis formant, en plan, un arc. On réserve ce nom à des structures affectant des ensembles de grande taille (plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres).

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin - BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039, rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80

Annexe 1 - Contexte géologique régional des Pyrénées

D'après la synthèse géologique et géophysique des Pyrénées (Barnolas et Chiron, 1996) et les travaux de A. Autran, M. Calvet, C. Duvail, G. Clauzon, P. le Strat, et O. Maurel.

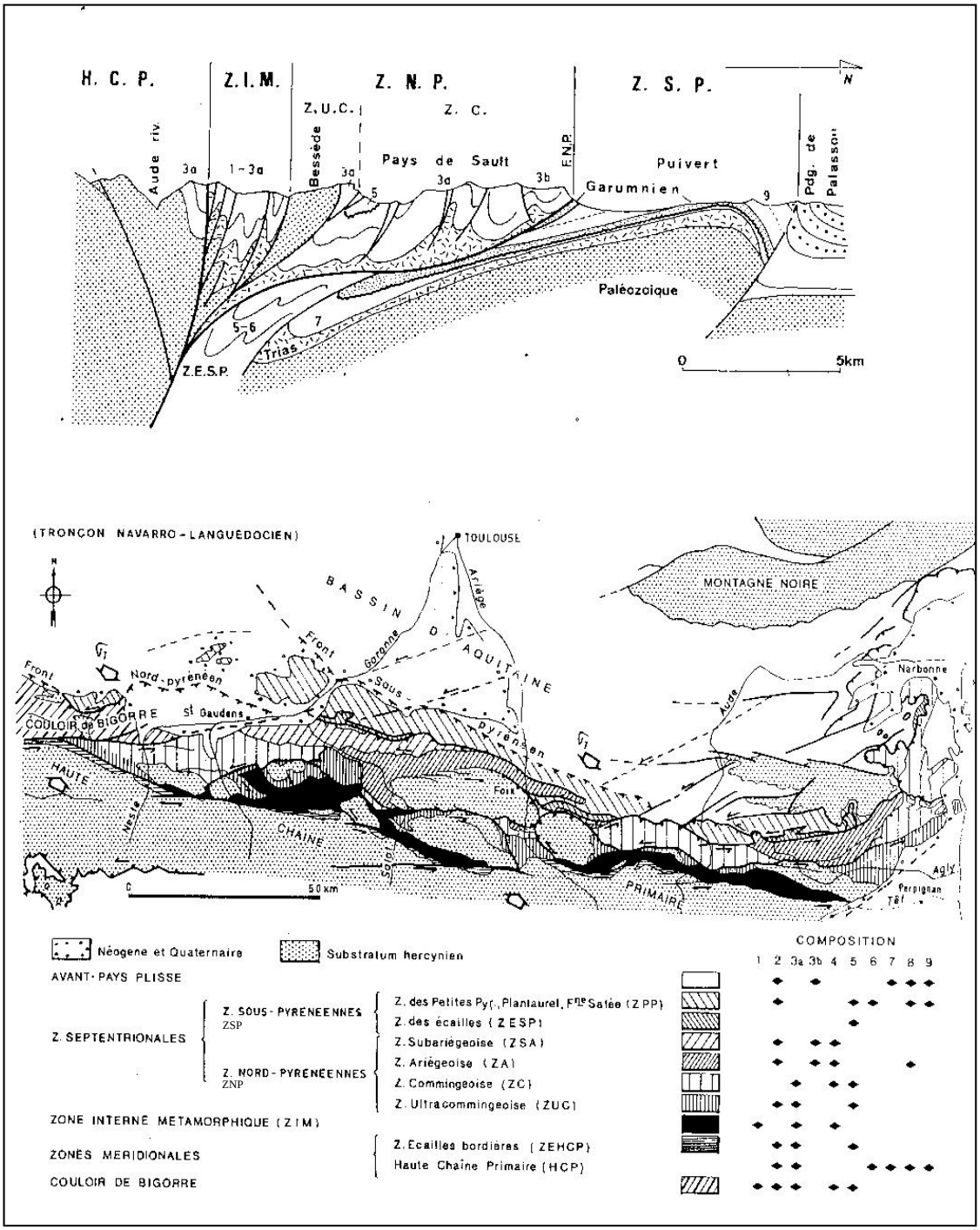
Les références bibliographiques indiquées dans le texte pourront être trouvées dans la synthèse géologique et géophysique des Pyrénées (1996).

Le substratum précambrien du Paléozoïque

La découverte d'une riche faune d'archaeocyathes d'âge botomien (Cambrien inférieur), dans les calcaires du groupe de Canaveilles (Perejon et al., 1992) à Terrades dans les Pyrénées catalanes authentifie l'âge cambrien attribué aux formations du paléozoïque inférieur distinguées par B. Laumonier et G. Guitard (1987) ou B. Laumonier (1988). On différencie des paragneiss au sens large, des métagranites parmi lesquels des gneiss œillés, des orthogneiss et des métabasites. Ainsi l'identification sous ce Paléozoïque basal de lithologies pré-métamorphiques, différentes de celles du Paléozoïque, permet d'envisager leur attribution au Précambrien. Il n'y aurait pas dans les Pyrénées, à l'affleurement, de socle structuré lors de l'orogenèse cadomienne.

Le paléozoïque au sens large

Il est évalué à une dizaine de kilomètres d'épaisseur dans les Pyrénées-Orientales. La totalité des affleurements paléozoïques anté-hercyniens (anté-Namurien) appartient au domaine du métamorphisme et de la schistosité dont le front supérieur n'est jamais atteint. Les relations lithostratigraphiques entre les orthogneiss et le Paléozoïque dans le massif du Canigou fait clairement apparaître (G. Guitard (1970), la discordance entre l'organisation des faciès pétrographiques correspondants à des protolites granitiques différents et le Paléozoïque. Une telle discordance cartographique n'implique pas une discordance stratigraphique dans la mesure où un massif de granitoïde composite montre couramment de telles relations avec son encaissant.



Carte géologique et coupe structurale générale (Souquet et al., 1976 & 1977)

Au nord de la grande faille inverse tardi-hercynienne (cf. figure ci-dessus) de la vallée de la Têt, les gneiss oeillés de la Carança entourés de gneiss alumineux en bancs, sont bien exposés sous la série de Canaveilles (gneiss de Thuès et Fontpédrouse).

D'est en ouest, les mêmes types d'orthogneiss sont recouverts par un Paléozoïque dont la position lithostratigraphique d'après les propositions de B. Laumonier (1996) devient de plus en plus jeune. Si l'on accepte l'assimilation des termes datés à Terrades du Botomien, avec la formation d'Evol, tous les orthogneiss de la zone axiale seraient recouverts par du cambrien inférieur.

Ainsi à une possible discordance cartographique, s'ajoute cette hétérochronie probable en grand des niveaux cambriens inférieurs de la série de Canaveilles, directement posés sur les orthogneiss ou les paragneiss. On assiste là à une discordance progressive probable des formations de Cabrils et d'Evol sur les massifs d'orthogneiss à l'Ouest du canigou

Le Paléozoïque inférieur

Roches schisteuses homogènes et monotones avec nombreuses intercalations de carbonates, elles sont d'un âge très imprécis. D'abord attribué au Cambrien anté-Caradoc (P. cavet 1957), elles ont été datée récemment à leur base du Néoprotérozoïque terminal (570 Ma - Vendien) dans un épais niveau de volcanites par U/Th sur zircon . Du fait d'une importante discordance entre l'Ordovicien supérieur et le Paléozoïque inférieur (Laumonnier 1987) ces séries restent attribuées au Néoprotérozoïque terminal et au cambrien. Le Paléozoïque inférieur est divisé en deux groupes lithostratigraphiques, le groupe de Canaveilles et le groupe de Jujols dans l'ordre stratigraphique (Laumonnier et Guitard 1986).

Le Paléozoïque supérieur

L'Ordovicien supérieur : Il repose en discordance cartographique sur différents niveaux du groupe de Jujols. Hartevelt 1970 et Laumonier 1987 insistent sur l'existence d'une importante discordance infra-caradoc, bien caratérisée à l'échelle régionale (Andorre, Pyrénées-Orientales, Espagne, Catalogne). Le Caradoc est caractérisé par l'apparition des premiers niveaux fossilifères et par d'importantes décharges détritiques. L'ensemble des faciès et leur variabilité portent témoignage de périodes d'instabilité, avec émersions éventuelles et milieux margino-littoraux, avec un volcanisme interstratifié (Aspres, Mouthoumet, Catalogne).

Le Silurien : Argiles carbonatées noires coupées de minces bancs ou nodules calcaires noirâtres, les schistes carbonés deviennent versicolores gris-jaune, verdâtres ou violacés, par altération supergène.

Le Dévonien : Passage continu entre le Silurien et le Dévonien et entre le Dévonien et le Carbonifère, dont la base (Dinantien) a le même type de faciès carbonaté que le Dévonien supérieur.

Le carbonifère : le Tournaisien est très mince. Du Viséen supérieur au Namurien, la série comprend une séquence de flysch de faciès Culm qui ont dû avoir une épaisseur considérable (2000 à 3000m).

La crise hercynienne

L'âge précis de la tectonique hercynienne dans les Pyrénées est connu depuis longtemps. Les derniers terrains impliqués dans la déformation majeure appartient à la base du Westphalien. L'âge des flyschs du bassin d'avant chaîne (au Sud du front orogénique) rajeunit d'Est en Ouest depuis le Viséen supérieur dans le Roussillon jusqu'au Westphalien B au pays Basque. Pour la partie profonde de l'édifice hercynien, les faits sont bien établis depuis les travaux de Guitard (1986). ce dernier a décrit dans les massifs du Canigou et du Roc de France un empilement de nappes de socle de type pennique à l'image des structures de la zone interne des Alpes

Les structures tangentielles majeures sont l'œuvre de phases tectoniques précoces hétérochrones d'est en Ouest comme le flysch d'avant chaîne Les plis couchés seraient soit contemporains d'une première phase sans schistosité soit d'une phase principale responsable de la schistosité majeure horizontale. Le plissement principal est synmétamorphe.

La granitisation est considérée comme postérieure à la mise en place des nappes qu'elle peut recouper franchement comme le massif de Costabonne. Les massifs granitiques sont pour l'essentiel mis en place pendant la fin de l'évolution métamorphique synschistosité et ils sont manifestement déformés par les épisodes tectoniques tardifs, notamment par de grandes zones de mylonitisation NW-SE à E-W particulièrement dans le massif des Albères, le Nord du Canigou et les Aspres.

Les granitoïdes hercyniens

En ce qui concerne la structure de la tectonique hercynienne et la géométrie des intrusions on se réfère à Autran et al. (1970 et 1996) qui met en lumière les relations existantes entre les intrusions et le métamorphisme général tant du point de vue génétique que du point de vue géométrique. Un fait essentiel est le caractère non enraciné des masses granitiques. Elles sont décrites comme de vastes langues stratoïdes insérées à différents niveaux de la pile crustale hercynienne, à la faveur de discontinuités mécaniques ou physiques. (CI110).

A l'Est des Pyrénées, les terrains les plus récents traversés par les intrusions ou affectés par les auréoles de contact appartiennent au Carbonifère inférieur. La datation sur zircon par U/Pb ou Pb/Pb sont plus cohérentes avec l'âge des déformations et datent la mise en place entre 315 et 305 Ma au Westphalien

La couverture

Du Permien au Crétacé supérieur

Trois séquences de dépôts s'individualisent dans cette évolution de très longue durée (Durand-Delga et al 1980, Puidefabregas et Souquet 1986). La première période, du Stéphanien au Trias inférieur, est marquée par le démantèlement, en régime continental distensif, de la chaîne hercynienne. Du Trias moyen au Néocomien règne un calme relatif et une mer épicontinentale recouvre une plate-forme à peu près stable

et uniforme. Enfin à partir de l'Aptien on entre dans la période préorogénique avec l'individualisation rapide de sillons marins instables et profonds dont la direction préfigure celle de la chaîne éocène. Le cycle se clôt avec la première phase pyrénéenne, intra éocène, ou anté Sélandienne (Peybernes 2000).

a- Le Stéphanien

Il affleure surtout au Sud de la Zone axiale de la Seu à Camprodon et dans quelques bassins exigus en marge du Mouthoumet. La sédimentation y est fluvio-lacustre et volcano-détritique.

b- Le Permien

Seuls s'individualisent clairement les bassins de la Seu et de la Pobla de Lillet où la formation Peranera atteint respectivement 2000 et 800m. Il s'agit des classiques séquences lie-de-vin. Sur les marges du bassin Hartevelt (1970) signale l'existence d'une discordance. Un volcanisme tholéïtique et rhyo-dacitique important s'y exprime (Synthèse Pyrénées 1996) avec en Ossau 2 épisodes volcaniques dont l'un à l'Autunien (–278 –272 Ma par U/Pb).

c- Le Trias inférieur

Souvent associé cartographiquement au Permien, il s'en distingue par son extension, son épaisseur plus uniforme et le caractère monogénique de ses poudingues à galets de quartz blanc bien roulés.

d- Du Trias moyen au Lias

Ces séries; épaisses de plusieurs hectomètres lorsqu'elles sont complètes, font alterner des ensembles carbonatés et des ensembles marneux.

La séquence triasique marque une large transgression laguno-marine. Le Muschelkalk se caractérise par des faciès calcaréo-dolomitiques et marneux avec plusieurs bancs massifs de calcaires sombres vermiculés. Le keuper, très tectonisé, comporte des argiles bariolées et gypseuses avec plus rarement du sel. Par contre il existe des cargneules et des épanchements d'ophites. dans les Corbières et le synclinal de l'Agly.

Le Lias voit débuter la sédimentation franchement marine, associant des dolomies à la base avec des calcaires compacts (200 à 300 m) au sommet. Le Lias moyen et supérieur offre une centaine de mètres de calcaires marno-grèseux et de marnes noires. (CI134).

Du Dogger à l'Aptien

Ces séries constituent l'armature de la plupart des reliefs prépyrénéens. Les faciès sont variés dans le détail mais souvent homogénéisés par la dolomitisation au Jurassique, puis beaucoup plus uniformes et de caractère récifal au Crétacé inférieur. Ce sont des dépôts de mer très peu profonde avec des passées laguno-lacustres, des émersions fréquentes ponctuées par des bauxites (Peybernès 1976).

a- Le Jurassique

Le Dogger des Corbières, puissant de 50 à 100 mètres, est très largement transformé en dolomie noire souvent assez massive. Il en va de même dans la zone du Sègre où les épaisseurs sont comparables dans les nappes calcaires de Pedraforca et de Boixols ou celles de l'Emporda.

Le Malm comporte des calcaires massifs ou en plaquettes (300m à Galamus et 600m sur le Sègre) très largement dolomitisés, surtout vers la base. Sur la bordure nord de la zone axiale, les épaisseurs se réduisent à 50 ou 100 m de dolomie noire (CI134).

b- Le Crétacé inférieur

Le Néocomien : Essentiellement calcaire, en bancs massifs, il surmonte à peu près partout une brèche limite hétérochrone souvent épaisse de plusieurs décamètres. Les épaisseurs sont de l'ordre de 200 m dans le chaînon de Galamus et les Corbières orientales. Elles sont maximales dans le secteur du Sègre (400 mètres).

Le Barrémo-aptien : Le Barrémien se caractérise par des faciès urgoniens massifs à rudistes et annélides. L'Aptien comprend cinq unités urgoniennes (Peybernès 1976) avec des variations verticales et latérales rapides en fonction de la dynamique des seuils et des bassins marins.

Les épaisseurs du Barrémo-aptien montrent de variations importantes, 2500m dans le Pays de Sault, 1500m dans les gorges de Pierre Lys, et encore vers l'est avec disparition des marnes vers Quéribus (300 m de calcaires). Dans la région d'Opoul la série à dominante calcaire mesure 600 à 700 m d'épaisseur. Au sommet apparaissent 200 m de grès verts, sombres.

La série des gorges du Sègre révèle encore des épaisseurs considérables avec plus de 2000 m à majorité marneuse dès l'Aptien. Vers Pedraforca comme à Emporda le Barrémien est réduit et la série aptienne carbonatée est à rapprocher de celle de Galamus.(CI135).

c- De l'Albien au Crétacé supérieur

L'albo-aptien : La sédimentation marneuse de bassin circalittotal très subsident s'amorce dès l'Aptien et se généralise pendant l'Albien. Les épaisseurs sont kilométriques pour l'Aptien des bassins d'Axat, de Quillan et des Fenouillèdes. Peybernès (1976) distingue quatre unités de calcaires urgo-albiens qui ne sont pas présentes partout. Dans le domaine oriental, des décharges grèseuses prodeltaïques apparaissent sous forme de grès vert sombre, de quartzites blancs ou même de grès rubéfiés.

Dans la zone du Sègre, l'Albien est absent. En Emporda, il se limite aux faciès urgoniens, à des calcaires argileux en plaquettes et à un complexe détritique saumâtre à marnes schisteuses. Le passage avec le Crétacé supérieur est assuré en continu par des calcaires grèseux et des microconglomérats (Bilotte et al., 1979).

Dans la Zone nord-pyrénéenne l'Albien coïncide avec l'apparition des premiers faciès flysch (Debroas, 1978) dont les affleurements restent limités dans ce tronçon oriental de la chaîne.

Le Crétacé supérieur : La transgression cénomanienne élargit fortement le domaine marin, mais par suite de l'évolution ultérieure, ces séries n'affleurent que très peu dans le domaine étudié : Ce sont les petits bassins orientaux d'Amélie à l'Emporda en séries autochtones et en nappes alpines. Le Crétacé supérieur n'est vraiment développé que dans les Corbières et la zone de Pedraforca.

Des Fenouillèdes aux Corbières, les faciès s'avèrent très variés avec passage rapide de niveaux compacts grèseux et carbonatés à des ensembles marneux ou marno-calcaires très épais (Bilotte, 1975, 1985 ; Bilotte et Séverac, 1989). Les faciès flysch existent encore dans la zone interne au Cénomanien et au Coniacien-Santonien dans la région d'Espezel.

Dans la zone sous pyrénéenne de puissantes formations marneuses de type bassin passent au Nord à des calcaires de plate-forme récifale au Cénomanien-Turonien.

Au Coniacien-Santonien les séries marneuses progradent vers le Nord sur le Mouthoumet.

Dans les Prépyrénées catalanes, les faciès de plate-forme marine l'emportent très largement et se développent jusqu'au Maastrichtien supérieur (Bilotte, 1985).

En Empordà, la série reste carbonatée du Cénomanien au Sénonien (Bilotte et al., 1979).

La limite Crétacé-Eocène et les faciès continentaux du Garummien : La régression générale dans l'est de la chaîne à la fin du Crétacé s'accompagne du dépôt de couches rutilantes fluviatiles et lacustres. Ce régime s'annonce au Nord dès le campanien (Bilotte, 1978) et se poursuit plus ou moins tardivement dans le paléocène jusqu'aux premières incursions marines du Thanétien voire de l'Ilerdien. Les épaisseurs sont considérables, de l'ordre de 700 mètres à Pedraforca. Dans l'autochtone sud-pyrénéen ce sont encore 200 à 300 mètres, comme au Nord de la chaîne où la barre calcaire du "Danien" lacustre" est un élément déterminant des paysages des Corbières aux petites Pyrénées. Il faut encore noter le sillon à hémipélagites du Dano sélandien découvert par Peybernès (2000).

Le métamorphisme nord-pyrénéen au Crétacé

Le métamorphisme pyrénéen de type haute température-basse pression n'affecte qu'une bande de quelques kilomètres de large au contact immédiat de la faille nord-pyrénenne (Ravier, 1959). Son âge et sa signification sont controversés. Les séquences carbonatées et dolomitiques ont recristallisé en marbres ou calcaires marmoréens blancs ou jaune clair et en dolomies marmorisées, assez purs et très compacts. Localement ces roches se chargent en minéraux silicatés de métamorphisme.

A l'est d'Estagel jusqu'à Espira d'Agly, les transformations sont faibles et les calcaires légèrement recristallisés. Les séries marneuses, seulement schistosées, montrent quelques filons quartzeux à minéraux. Au centre, de Millas à Gincla, l'unité de Boucheville comporte surtout une puissante masse de cornéennes noires où le métamorphisme a atteint des températures supérieures à 550°C. Plus à l'Ouest, les cornéennes n'affleurent qu'en étroits synclinaux, à Rodome par exemple et ce sont les calcaires marmoréens antérieurs qui forment l'armature des massifs du Bac d'Estable, du Clat, de Belcaire et du col de Marmare-Montaillou.

Le métamorphisme pyrénéen était classiquement considéré comme thermique et lié à l'enfouissement des sédiments (Ravier, 1959). Choukroune montre dans les zones internes qu'il est partiellement syntectonique et associé à des déformations (Goldberg et Leyreloup 1990 – Synthèse Pyrénées 1996, tome 2). Les nombreux ages radiométriques dont on dispose maintenant donnent un âge compris entre 100 et 80 Ma. Si la tectonique compressive démarre précocement à la marge sud des bassins on pourrait donc concilier un métamorphisme statique et thermique, lié à l'amincissement crustal crétacé et associé à un magmatisme alcalin lui aussi bien daté et un métamorphisme dynamique syntectonique marqué par l'orientation préférentielle de certains minéraux et peut-être légèrement postérieur. (CI140)

Problèmes géodynamiques et paléogéographiques liés à l'ouverture des "rifts d'âge crétacé inférieur à moyen"

La destruction de la chaîne hercynienne des Pyrénées a été rapide. La tectogénèse en compression s'achève vers 290 Ma. Au Trias inférieur vers 230 Ma, l'abrasion est achevée. La durée maximale nécessaire à l'aplanissement est donc dans ce cas d'une soixantaine de millions d'années. L'érosion pré triasique a partout atteint les niveaux structuraux profonds marqués par la schistosité régionale, voire la foliation dans le domaine oriental. Cela suppose l'ablation d'une tranche de terrains d'au moins 8 à 12 Km dans la partie orientale.

La plate-forme continentale héritée du cycle hercynien est restée fragile et se fragmente rapidement, dans la dépendance du rifting téthysien. L'extension crustale est marquée par les épanchements d'ophites , à la limite Trias – Lias, et le rift continental triasique est contrôlé par des fractures principalement NE-SW.

Par la suite une stabilité relative s'instaure avec l'installation de la plate-forme carbonatée du Lias-Néocomien.

La paléogéographie des bassins marins mésozoïques implique (Peybernès, 1976) l'existence d'un bassin marin unique à travers la zone axiale et une immersion généralisée et permanente au moins à l'Ouest de la Cerdagne. Il montre que les lignes isopiques s'organisent obliquement selon une direction NE-SW et se raccordent de part et d'autre du hiatus axial. Des arguments paléontologiques impliquent des axes de permanence marine favorisant les migrations d'espèces mésogéennes ou atlantiques à travers le domaine actuel de la haute chaîne.

Régressions et émersions locales apparaissent dès le Jurassique supérieur, avec la formation de bauxites sur les marges, tant dans le domaine nord-pyrénéen que dans les Sierras catalanes. (CI139)

Le rifting crétacé est l'évènement fondamental qui préfigure la future chaîne pyrénéenne.

Si les brèches, poudingues et discordances anté-cénomaniens sont mis au compte de mouvements verticaux extensifs, sur les marges de fosses marines très instables et subsidentes, découpées en systèmes de blocs basculés à l'image des marges passives actuelles (Boillot et al., 1984 ; Boillot, 1978, 1986), l'accord est loin d'être fait sur la géométrie et la cinématique de l'ouverture des fosses à partir de l'Aptien. (CI139)

Le Pichon et al.(1970) invoque le premier un coulissage sénestre de 400Km de l'Ibérie par rapport à l'Europe, le long de la faille nord-pyrénéenne, pendant le Crétacé.

P. Choukroune (1974) et Choukroune et al. (1973) reprennent l'hypothèse avec l'ouverture en distension de sillons étroits le long de la faille nord-pyrénéenne, vue comme un accident unique.

La géométrie complexe de cette zone est ensuite beaucoup mieux prise en compte par Choukroune et Mattauer (1978). Ces derniers l'interprètent plutôt comme une transformante large de 100Km et associant de nombreux bassins de type pull-apart étroits et disposés en relais. L'idée d'un grand décrochement lithosphérique est fondamentale pour expliquer la localisation et le caractère rectiligne de la chaîne (Mattauer, 1968).

Peybernès (1976, 1978 ; Souquet, 1978) récusent l'idée d'un tel coulissage et donnent la plus grande part à des fractures obliques NE-SW recoupant un bras de rift albien issu du Golfe de Gascogne.

Puigdefabregas et Souquet (1986) considèrent que le rifting albien donne lieu à des bassins losangiques très vastes et de forme peu allongée. Puis à partir de l'Albien, les sillons sont plus étroits et progressivement rejetés vers le Nord avec l'instauration d'un régime compressif permanent à leur marge méridionale (Debroas, 1978). Il s'édifierait ainsi un bourrelet d'accrétion tectonique au front de la zone axiale.

Du Sègre à l'Eséra il existe des faits similaires avec mise en place de structures chevauchantes synsédimentaires successives du Turonien terminal à la fin du Crétacé (Souquet et Deramond, 1989). (CI140)

Si les déformations compressives commencent dès le Turonien, l'histoire sédimentaire confirme la persistance de la mer dans tout le domaine pyrénéen jusqu'au Maastrichtien inclus. Il semble cepêndant que dans la partie orientale de la zone axiale, les faciès "garummiens" du Maastrichtien au Danien soient directement transgressifs sur le socle érodé du bord sud de la zone axiale (secteurs France – Espagne des Pyrénées – Orientales), et supportent la nappe de Ripoll. Le point de départ de la chaîne, du moins dans son tronçon oriental, coïncide avec la régression brutale et généralisée qui caractérise la fin de la période du Maastrichtien et

l'instauration d'un régime de sédimentation détritique et continental (Bilotte, 1985 ; Plaziat, 1981, 1984 ; Freytet, 1971).

L'âge fini-crétacé de cette première phase pyrénéenne (Mattauer et Proust, 1965 ; Mattauer, 1968) est clairement intramaastrichtienne, les dépôts continentaux de cet âge scellant en plusieurs points la déformation (Bilotte, 1978 ; Plaziat, 1984). La déformation atteint là son intensité maximale dans la zone nord-pyrénéenne où elle a pu s'amorcer dès le Crétacé moyen comme le suggère son lien avec le métamorphisme. (CI140)

L'orogénèse pyrénéenne et l'évolution géodynamique paléogène (CI141)

Le dispositif paléogéographique, au début du Tertiaire, est hérité de la phase fini-crétacée. Pour la première fois, il se calque sur la géométrie actuelle de la côte avec deux sillons au Nord et au Sud d'importance inégale.

Lors de la transgression ilerdienne, ces paléo-Pyrénées émergées se limitent à un court promontoire ne dépassant pas le Puymorens à l'Ouest, le Conflent et les Aspres vers le Sud (Plaziat, 1981, 1984). Villatte (1987) pense au contraire que l'émersion serait plus généralisée vers l'Ouest et un rivage méridional de la mer ilerdienne serait suivi depuis les Corbières jusque vers Lavelanet et les Pyrénées centrales.

A partir de la fin de l'Ilerdien (56 Ma), l'ensemble du système évolue sous le contrôle des phénomènes orogéniques pyrénéens. Les sillons marins s'approfondissent et se déplacent vers les marges. La sédimentation continentale de plus en plus grossière, se généralise dès avant la fin de l'Eocène, mais des différences sensibles existent entre les sillons méridionaux et septentrionaux.

La série paléocène des Corbières est essentiellement continentale, mais elle admet trois minces passées marines au Thanétien et au Sparnacien inférieur. La régression définitive se place pendant l'Ilerdien supérieur.

Le bassin catalan se caractérise par la puissance de ses séries marines et la migration de l'ombilic sédimentaire et des séquences de faciès vers le Sud, en phase avec les déformations pyrénéennes, à partir du Cuisien.

La sédimentation paléogène sur les deux versants de la chaîne a clairement enregistré les phases et les modalités de l'orogénèse pyrénéenne. Les faits majeurs sont connus depuis longtemps, en particulier sur le versant méridional (Dalloni, 1930 ; Ashauer, 1934 ; Birot, 1937 ; Rios et al., 1943 ; Crusafont et al., 1956 ; De Sitter, 1961).

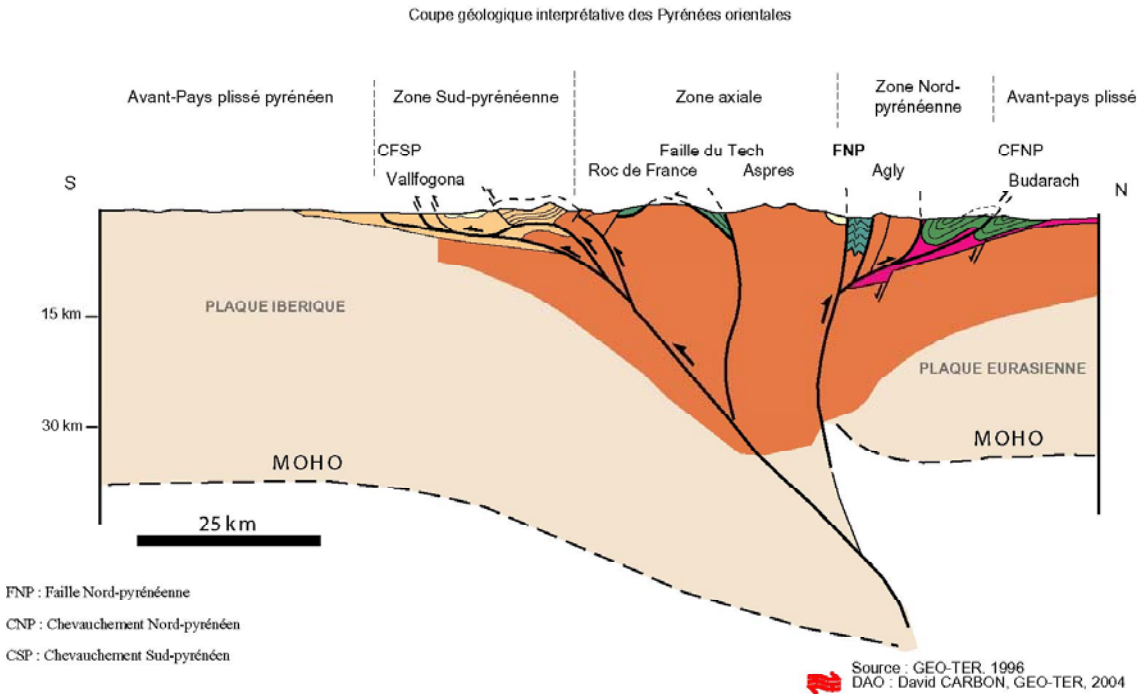
Les Pyrénées présentent les caractères d'une chaîne de collision intra continentale entre les plaques européenne et ibérique, un temps soumise à l'extension au cours du Crétacé. L'accord n'est pas fait sur la géométrie de la zone de contact et les modalités de l'extension qui pour certains a pu aller jusqu'à la création d'un fond océanique, disparu aux stades précoces de convergence par une subduction à vergence sud (Boillot, 1978 ; Boillot et al., 1984).

Trois faits majeurs semblent acquis :

1. Le dispositif relativement symétrique en éventail de la zone déformée,

2. L'épaississement considérable de la croûte sous la zone axiale (Moho encore aujourd'hui déprimé à environ 50 Km de profondeur),

3. Le rôle essentiel joué par la Faille nord-pyrénéenne, axe de symétrie de la chaîne et fracture lithosphérique pouvant décaler le Moho (Mattauer, 1968 ; Choukroune et al., 1973 ; Daignères, 1978 ; Durand Delga et al., 1980).



Les profils ECORS (1988) et la tomographie sismique (Granet et Souriau 1996) permettent une interprétation à l'échelle de la plaque lithosphérique. Ainsi le bourrelet axial est assimilé à un prisme d'accrétion crustal greffé sur une subduction continentale à vergence nord de la plaque ibérique identifiée en tomographie jusqu'à plus de 100 Km de profondeur. La plaque européenne emboutit l'ancienne zone fragile déversée au Nord selon des chevauchements réutilisant les anciennes failles listriques de la phase d'extension.

Le raccourcissement total dans l'Est de la chaîne est estimé à environ 80 Km (Séguret et Daignères, 1985, 1986 et Vergès 2000).(CI147). La subduction continentale à vergence nord de l'Ibérie paraît bien prouvée sur le profil ECORS (1988). La faille nord-pyrénéenne serait largement tordue et emboutie par la plaque européenne.

Le socle, quant à lui, ne réagit pas de manière passive et rigide aux phase alpines. Mattauer et Séguret (1966) et Séguret (1970) montrent le développement de déformations souples et de schistosités alpines dans les terrains hercyniens des Nogueras. Dans les Pyrénées orientales cependant, ces effets restent modérés et localisés dans une bande étroite au contact du mésozoïque (Pascal et al., 1976). A

l'échelle des grandes structures, on peut admettre aussi un rejeu des mylonites et des ondulations tardihercyniennes. De grands accidents cassants ou ductiles, à jeu inverse et décrochant, jalonnés de mylonites (notamment de celles qui sont orientées E-W à NW-SE) ont certainement fonctionné à l'Alpin mais il est difficile de les distinguer des jeux tardi-hercyniens .

Le socle de la zone nord-pyrénéenne est intensément écaillé et les diverses unités sont limitées par des accidents cassants curvilignes N90°-N110° et subverticaux. L'idée de coins extrusifs effilés vers le bas et désolidarisés de la plaque européenne a été proposée pour les massifs ariégeois (Souquet et Peybernès, 1987). Elle semble confirmée par le profil ECORS et peut être étendue aux massifs orientaux comme l'Agly. Par contre plus au nord le massif du Mouthoumet est considéré comme autochtone (Il est considéré comme l'avant-pays septentrional).

A la marge méridionale de la zone axiale le dispositif connaît d'intenses écaillages dans le secteur du Freser qui peuvent être étendus à toute la marge de la zone axiale jusqu'à l'Empordà (Munoz et al., 1989 (CI150), J.Vergès 2000, Ribero, Vilas y casas 2001 Geologia hispanica 36, p.97-113).

Fontboté et al., 1986) propose pour l'ensemble de la zone axiale orientale un modèle qui serait constitué d'un empilement de grandes dalles allochtones assez minces séparées par de grands plans de chevauchements peu inclinés. En Vallespir, Laumonier et Baestens, 1986 et Laumonier, 1987 confirment l'intense découpage alpin de ce secteur de la zone axiale. La faille normale néogène du Tech (EW) qui est responsable de la surrection du Roc de France est postérieure et remonte le chevauchement du Canigou au dessus du Roc de France. La géophysique indique d'ailleurs que l'accident du Tech, est d'importance crustale et semble décaler le Moho de près de 5Km (Gallart et al.,1982).

La tectonique des couvertures dans la zone septentrionale reprend avant tout les plis fini-crétacés de la zone nord-pyrénéenne. Le style est différent, essentiellement cassant avec formation de chevauchements à vergence nord sur les marges des structures antérieures et écaillages (Mattauer et Proust, 1965 ; Légier et al., 1987). Les accidents majeurs sont le chevauchement de Maury-Vingrau et celui de Roquefort, qui amènent les calcaires massifs sur les marnes albo-aptiennes et surtout le Front nord-pyrénéen qui pousse la série carbonatée résistante sur les séquences flyschoïdes du crétacé supérieur et les séries peu cohérentes du Paléocène-Eocène inférieur. Plus au Nord, les plis qui s'édifient dans le Crétacé supérieur ou l'Eocène des Corbières sont des formes très lourdes, moulées sur des voussoirs de socle et rarement ou faiblement décollées.

L'ampleur des déplacements tangentiels reste soumise à discussion. Amorçant la double virgation languedocienne, la nappe des Corbières (Viallard, 1987) est connue depuis longtemps et ses recouvrements anormaux sont évidents. Son arrière-pays lui-même, aux structures tranquilles, de Périllos à la Clape, serait décollé et déplacé vers le NW, voire le NNE selon d'autres interprétations (Cornet, 1980). En avant du Front nord-pyrénéen, le Mont Tauch est interprété comme une klippe d'Urgonien flottant sur un substrat varié et écaillé ; mais l'examen des contacts en arrière de Tuchan suggère

plutôt un chevauchement du Trias sur l'Urgonien de Tauch. La lame de Camps-Peyrepertuse est décrite par Bilotte (1985) comme une écaille-nappe déracinée et déplacée d'au moins 12 Km vers le Nord. Plus à l'Ouest encore, les coupes schématiques de Souquet et Peybernès (1987) admettent l'allochtonie totale du Pays de Sault déplacé de plus de 10 Km sur le Néocrétacé.

L'interprétation ultranappiste est généralisée dans la zone méridionale avec un empilement d'unités d'âge et de composition différents.

Les unités supérieures à matériel mésozoïque sont celles pour lesquelles d'amples translations sont les moins discutables. Il s'agit d'abord de l'ensemble de Pedraforca longtemps considéré comme autochtone (Ashauer, 1934 ; Birot, 1937 ; Guérin-Desjardin et Latreille, 1961), mais qui s'avère bien flotter sur la série éocène affleurant au Cadi et au Port de Comte (Séguret, 1970 ; Solé Sugranes, 1973). Tout à l'est de notre domaine, en Empordà, la réalité de petites nappes de gravité glissées depuis la zone axiale n'avait jamais été remise en question pour les lambeaux de Coustouges, de Bac Grillera, voire de Viure (Ashauer, 1934 ; Birot, 1937 ; Casteras et Auriol, 1958 ; Estevez, 1968 a et b). La nature allochtone de l'unité de Figueres-Montgri parait à peu près certaine (Solé Sabaris et al., 1956 ; Bilotte et al., 1979).(CI151). Les coupes géologiques décisives de sismique et de gravimétrie réalisées par Alberto Casas, Rivero, Rivas et Casas (2001) en rendent bien compte.

Les unités inférieures à matériel éocène ont été mises en évidence plus récemment. Elles forment une ample nappe du Cadi, monte à L'Est de Camprodon au-dessus du tégument garummien, et vers le Sud dans les Gypses de la formation Beuda (Puigdefabregas et al., 1986 ; Fontboté et al., 1986). L'unité de Cadi proprement dite pourrait s'enraciner loin au Nord. En Empordà elle est représentée sous les unités de Viure-Bac Grillera, formée par les petites nappes déjà évoquées par le substrat éocène sur lequel elles sont posées. Elle passe au Nord à la nappe du Vallespir de Laumonier (1987). L'unité basale, très généralement masquée, est reconnue vers Ripoll au forage du Serrat : Elle est assimilée pour ses racines à l'unité du Roc de France (Martinez et al., 1989 ; Pujadas et al., 1989), nappe du socle sous et plus récente que la "nappe du Canigou" (Laumonnier, 1987).

Les reconstructions rétrotectoniques posent le problème des déplacements présumés de toute cette couverture glissée. La zone axiale, patrie indiscutée de toutes ces nappes, apparaît quelque peu exiguë, même en y admettant un raccourcissement d'une cinquantaine de kilomètres. (CI152). Si l'on reporte le bassin marin éocène au droit du Canigou et de la Cerdagne, il faut admettre que les unités de type Pedraforca sont issues d'un domaine encore plus septentrional. La conclusion devrait montrer la partie tirée du profil Ecors et des profils catalans qui le prolonge pour autantifier les très importants déplacements et raccourcissements horizontaux supérieurs à 80 Km.

Chronologie des déformations et cadre orogénique pyrénéen

La tectonique pyrénéenne est souvent présentée dans les travaux récents comme un phénomène continu, étagé du Crétacé supérieur au Miocène, sans paroxysme bien net, avec mise en place progressive et successive des diverses nappes et unités

tectoniques. Les synthèses structurales imposent plus ou moins explicitement cette façon de voir (Munoz, Verges, Beaumont, 2000). Les analyses patientes de la stratigraphie et de la sédimentologie des grands bassins bordiers conduisent à des conclusions similaires (Enjalbert, 1960 ; Bomer, 1978). L'existence de phases individualisées, ou de paroxysmes dans un continuum est argumentée par des discordances nettes sur les bordures, parfois généralisées, et de brutales venues détritiques particulièrement puissantes à certaines périodes (Plaziat, 1984). (CI153).

La volonté de généraliser à toute le chaîne pyrénéenne un modèle théorique de structuration des nappes, à partir d'observations réalisées dans sa partie centrale est une difficulté. En ce qui concerne les différentes unités du versant sud, elles se seraient mises en place successivement de la plus haute à la plus basse par décollements sur des plans de plus en plus profonds émergeant de plus en plus loin vers les avant-pays selon un modèle de sous charriage constant de la plaque ibérique conforté par le profil ECORS et les tomographies lithosphériques et/ou mantelliques de Sourian et Granet (1995).

Il importe de distinguer trois ordres de faits :

1. Le serrage de la zone axiale et son débitage en panneaux par des cisaillements plus ou moins inclinés,

2. L'épaississement crustal,

3. L'individualisation de nappes de couverture.

Il n'y a aucune raison pour que le phénomène ait été parfaitement continu pendant 30 à 40 Ma surtout si l'on regarde la complexité des mouvements de plaques dans l'aire méditerranéenne (Téthys 2000). Par ailleurs, la mise en place des nappes est un fait induit par le serrage de la zone axiale, mais entretenu par le soulèvement d'ensemble qui permet un glissement gravitaire (Séguret, 1970). Aussi ce glissement peut conserver un caractère relativement continu. Il ne peut donc pas être un marqueur fiable et absolu des phases de déformation crustale ni des épisodes de soulèvement majeur. Les empilements de nappes renseignent sur ces déformations aux marges de la chaîne. En ce qui concerne l'axe de la chaîne lui-même, le marqueur essentiel est constitué par les séquences conglomératiques de piémont dont on peut déduire l'énergie des reliefs contemporains. C'est ce que plusieurs auteurs ont tenté de modéliser (Vergès, Munoz et al. 1998, 2001).

Sur le versant nord des Pyrénées orientales, l'apparition des premiers reliefs importants coïncide avec la régression fini-ilerdienne et le développement d'un piémont conglomératique extrêmement puissant constitué par la molasse de Carcassonne et les "poudingues des Serres inférieures". Dans cette série épaisse localement de plus de 2000 mètres, la moitié inférieure ne comporte que des éléments de Mésozoïque, mais les galets de Paléozoïque apparaissent dès avant les calcaires lacustres médians et se généralisent ensuite. Leur composition indique des reliefs sur la Zone axiale et une érosion active des séries du Paléozoïque inférieur et des batholites granitiques (Bessière et al. notice de la carte géologique à 1/50 0000 de Limoux, 1978).

Sur le versant méridional des Pyrénées, la deuxième moitié de l'Ilerdien et le Cuisien voient le début du glissement des nappes supérieures. Il se fait principalement sous le niveau de la mer et est précédé par la mise en place d'olistolites. Le premier grand piémont conglomératique, encore en position septentrionale, est constitué par la formation Bellmunt, attribuée au Lutétien en raison des passages latéraux observés avec les séries marines méridionales. Ce serait donc l'équivalent du Palassou inférieur sur le flanc nord de l'orogène.

L'instabilité tectonique paraît donc permanente sur les deux versants, de l'Ilerdien à la fin du Lutétien (CI154). Cela coincide avec les données de traces de fission sur apatite qui datent une première surrection majeure de la zone Nord pyrénéenne et Nord de la zone axiale à 47, 42 Ma (Fitzgerald, Munoz, Coney, Baldwin (1999) E.P.S.L. 173, p. 157 – 170 et thèse Maurel 2003)

L'état de la chaîne des Pyrénées de la fin du paléogène au début du néogène avant le stade de rifting est donné pour l'Est de la chaîne par les travaux de Vergès (2000) sur la transversale Nord - Sud Sierra del Cadi – Ariège. On y voit clairement l'empilement hétérochrone de lames " en séquences" thick skin" dans le socle passant à "thin skin" dans la couverture. les plus récentes sont les plus les plus profondes et les plus anciennes sont transportées sur leur dos (piggy-back), soulevées et érodées. Quelques failles "out of sequence" telles celles de Ribes-camprodon, de l'Hospitalet, de Mérens, en gros Est – Ouest participent à l'exhumation du socle beaucoup plus précoce à l'Est qu'à l'Ouest

Le véritable acte de naissance de la chaîne pyrénéenne, en tant que bourrelet montagneux, se place depuis le Bartonien et le Ludien et plus précisément à la charnière entre ces deux étages. C'est alors que sont scellées les structures majeures, que la régression est généralisée dans le bassin de l'Ebre, transformée en cuvette endoréique, et que se mettent en place les ensembles conglomératiques les plus puissants. Les différences entre les versants nord et sud persistent puisqu'au Nord, le Palassou ne dépasse guère le Bartonien et que la molasse ludienne du Lauraguais et de la région de Pamiers est assez mince et modérément grossière. Au Sud, le piémont conglomératique majeur couvre le Ludien et l'Oligocène inférieur.

Du rifting Oligo-Aquitanien à la transgression marine Miocène dans les bassins des Corbières

Sept bassins, d'importance très inégale, s'ouvrent dans ce domaine structural particulièrement complexe marqué par la grande virgation des axes pyrénéens. Leur remplissage détritique, souvent mal daté, est en général très démantelé et les géométries initiales sont difficiles à restituer. Au SW s'alignent les petites cuvettes de Paziols, Tautavel et Estagel. A l'Est le bassin de Lapalme alors que le fossé de Sigean-Narbonne est déjà en position plus interne. Les fossés de Thézan Fabrezan sont aux marges septentrionales du domaine.

On rappelle les principaux travaux sur le secteur de Doncieux (1903), Barrabé (1944, 1948), Rosset (1964) et l'établissement des cartes géologiques à 1/50 000 de Narbonne par Lespinasse et al.(1982) et de Leucate par Berger et al.(1982).

Les bassins des Corbières orientales = Principales implications géodynamiques

Bien qu'ils n'apportent guère de renseignements directs sur l'évolution de la chaîne axiale pyrénéenne, ces petits bassins sont riches de données sur l'histoire régionale de cette bordure méditerranéenne, suivie presque en continu de 30 à 11 Ma. La persistance des déformations distensives, au-delà du rifting oligo-aquitanien, est patente dans le bassin d'Estagel, de Thézan-Fabrezan et quasi certaine dans la cuvette d'Estagel. De brefs épisodes compressifs peuvent exister en liaison avec les phases tardives de la tectogénèse pyrénéenne. Le fait essentiel, du point de vue géomorphologique, est l'établissement du niveau de base méditerranéen au travers de l'axe orogénique. La transgression miocène n'a dépassé le trait de côte actuel qu'assez tardivement et pour une brève période, du Burdigalien supérieur au Serravalien basal. Le rivage bordait, vers la cote +100 mètres actuelle, les Corbières orientales. Il ne s'avançait largement à l'intérieur des terres qu'à la faveur des fossés septentrionaux, beaucoup plus hypothétiquement jusqu'au bassin d'Estagel. Cette transgression paraît préparée et précédée au Burdigalien inférieur par un événement géodynamique important, d'ordre probablement tectonique, pressenti dans les bassins de Sigean et de Lapalme et retrouvé dans le bassin d'Estagel. Le caractère tardif de la transgression, malgré la manifestation des hauts niveaux eustatiques de l'océan global en Languedoc et en Provence au cours de l'Aquitanien et du Burdigalien (cycles TB1-4, TB 1-5,TB 2-1 ; Haq et al., 1987), ne peut s'expliquer que par des causes tectoniques locales : De l'Aquitanien au Burdigalien moyen, une tendance au soulèvement au droit de l'axe pyrénéen et sur ses marges existe, significatif du bourrelet latéral du rift.

La masse essentielle des remplissages des bassins est représentée par des sédiments détritiques fins voire biochimiques. Le détritique grossier reste cantonné sur les marges et à certains niveaux stratigraphiques sauf dans les bassins de Paziols-Estagel, plus proches de l'axe de la chaîne. Les faciès biochimiques continentaux connaissent une expansion remarquable à trois reprises : A l'Aquitanien avec les calcaires de Sigean ; au Chattien avec les calcaires du Sautet et au Tortonien au Nord des Corbières.

Le fossé du Roussillon

Le Roussillon est un bassin séparé des Pyrénées, au Sud, par le faisceau des failles des Albères Vallespir, des Corbières au Nord, par le faisceau des failles de Prades et à l'Ouest par le massif des Aspres. A l'est le bassin est largement ouvert sur la Méditerranée. L'histoire géologique du Roussillon entre dans le cadre géodynamique d'une marge passive, celle du Golfe du Lion (Gorini 1993, Guennoc, Gorini, Mauffret 2000).

La méthodologie d'étude du remplissage cénozoïque de ce bassin repose tout d'abord sur une analyse cartographique de synthèse. C'est ce qui a été réalisé depuis 1996 et une carte de synthèse a vu le jour et présentée en 2001 lors de l'atelier "GDR marge" sur le Messinien à Perpignan (Le Strat, Duvail, Clauzon, 7-10 septembre 2001). Cette carte de synthèse permet de mettre à jour plusieurs ensembles sédimentaires dont l'architecture, les géométries et les mécanismes restent à préciser même si leur extension géographique est à peu près connue. La démarche employée pour connaître

ces modes de génèse est de rassembler toutes les données de sismique et de subsurface (diagraphies des forages pétroliers et aquifères) et d'en faire la synthèse à partir de modèles génétiques fondés soit sur des géométries tirées des affleurements et forages, soit sur de la sismique.

On peut différencier d'un point de vue cartographique :

- Un ensemble oligo-miocène synrift puis postrift positionné sur de la sismique onshore des années 1954 et 1959 de la Société Nationale des Pétroles Languedoc Méditerranée et validé par des profils offshore de Elf et Total (1968) exploités de 1995 à 2002, avec sondages permettant la datation des corps identifiés.

- Un ensemble de transition Tortonien et Messinien établi essentiellement à partir des affleurements et de la sismique.

- Un ensemble pliocène inférieur basé sur le modèle des "Gilbert deltas" : delta en eaux profondes dominés par des apports fluviatiles. Il existe des prismes sédimentaires synchrones, dont la partie marine sableuse est dominée par des structures de vagues et qui, de fait, ne peut pas être assimilée aux systèmes sableux des "Gilbert deltas".

- Un modèle Pléistocène assis sur des modèles géométriques de terrasses étagées au niveau du Tech, de la Têt, du Réart et de la Canterranne.

- Un modèle génétique Holocène post Flandrien calibré par des données de subsurface et par un modèle géométrique tiré de l'analyse des terrasses.

Annexe 2 - Quelques notions sur les éléments chimiques

Anions et cations majeurs

Calcium (Ca^{2+}) : Il est issu de l'altération de minéraux contenant du calcium, tels que les silicates d'aluminium, présents dans les roches magmatiques (Tableau 5). Il peut subir des phénomènes d'échange de base (avec le sodium Na+ notamment) dans les niveaux argileux.

Carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) : La présence de bicarbonates et de carbonates peut être due à la dissolution de la calcite $CaCO_3$ par une eau acide. L'influence du pH sur les équilibres carbonatés est importante : à pH acides, les bicarbonates sont largement prédominants sur les carbonates.

Magnésium (Mg^{2+}) : Il peut avoir comme origine l'hydrolyse de minéraux ferromagnésiens. Il peut également subir des phénomènes d'échange de base dans les niveaux argileux.

Chlorures (Cl^-) : Ils ont pour origine principale les pluies. Ils peuvent aussi être le signe d'une pollution organique par les effluents d'origine animale, et les fosses sceptiques. Ils ne sont pas absorbés par le sol, et peuvent donc se déplacer sur de longues distances.

Potassium (K^+) : Il peut provenir de l'hydrolyse des minéraux silicatés, et de pollutions par les engrais potassiques, les effluents animaux et végétaux, les rejets de stations d'épurations

Silice (SiO_2) : Les teneurs en silice proviennent essentiellement des minéraux silicatés. Elle est peu soluble sous nos climats froids, et sa mise en solution est très lente, ce qui constitue un indicateur du temps de séjour d'une eau dans un réservoir. Les silicates ou la silice hydratée ont une solubilité qui est très améliorée par la température, c'est ce qui explique leur plus forte concentration dans les eaux minérales chaudes.

Sodium (Na^+) : Il peut avoir pour origines l'hydrolyse des minéraux silicatés, la libération par les argiles lors des échanges de base avec le potassium, le calcium, et le magnésium, l'apport par les pluies.

Sulfates (SO_4^{2-}) : Ils peuvent avoir pour origines l'oxydation des minéraux sulfurés (par exemple l'oxydation de la pyrite de fer FeS_2 par les nitrates), les apports par les pluies, les pollutions par les traitements agricoles (traitement des vignes au sulfate de cuivre), les détergents, les industries agroalimentaires (élevage de poules pour la production d'œufs).

Anions et cations en trace, micropolluants métalliques

Aluminium (Al^{3+}) : C'est un élément trace qui n'existe en solution sous cette forme échangeable qu'à des pH acides inférieurs à 5. Il est suspecté intervenir dans la maladie d'Alzeihmer.

Ammonium (NH_4^+), Nitrites (NO_2^-), Nitrates (NO_3^-) : Ces trois éléments qui peuvent être présents dans les eaux souterraines font partie du cycle de l'azote.

- L'ammonium NH_4^+ est généralement un indicateur de pollutions anthropiques de différentes origines : engrais chimiques, rejets animaux, eaux usées. Il provient aussi de la fixation biologique de l'azote atmosphérique par les plantes, ainsi que des dépôts atmosphériques. Sa présence pose des problèmes lors de la désinfection de l'eau potable par le chlore. De plus, il est l'acide conjugué de l'ammoniaque NH_3, toxique pour les poissons.

- Les nitrites NO_2^- sont des éléments intermédiaires de nitrification/réduction entre l'ammonium et les nitrates. En présence d'hémoglobine du sang, ils donnent naissance à la méthémoglobine, qui est impropre à transporter l'oxygène du sang vers les tissus. Les nourrissons sont très sensibles à cette affection qui provoque des cyanoses. Des présomptions de risques cancérigènes justifient le maintien de normes strictes. A fortes doses, les nitrites ont des effets tels que l'hypertension, l'anémie, l'infertilité, et les troubles nerveux sur l'homme et les animaux.

- Les nitrates NO_3^- ont plusieurs origines : origine diffuse, par entraînement des surplus des engrais minéraux ou organiques non utilisés par les plantes, origine ponctuelle, par rejet d'eaux usées domestiques, agricoles ou industrielles, et origine naturelle, par dégradation de la matière organique.

Antimoine (Sb^{5+}) : Le principal minerai en est la stibine Sb_2S_3. Il est souvent associé dans les filons à Fe, As, Ag, Ni, Co.

Argent (Ag^+) : On rencontre cet élément métallique avec de nombreux autres minéraux dans des filons à gangue siliceuse ou carbonatée.

Arsenic (As^{5+}) : C'est un corps proche des métaux, que l'on trouve principalement dans les filons avec le nickel, le cobalt, l'argent,… Le principal minerai est l'arsénopyrite FeAsS. L'arsenic peut donc être présent en même temps que le fer. L'espèce dominante est $HAsO_4^{2-}$ pour les pH supérieurs à 6,5, et $H_2AsO_4^-$ pour les pH inférieurs à 6,5. L'arsenic est un "poison lent". Il peut induire des cancers de la peau.

Baryum (Ba^{2+}) : C'est élément métallique entrant dans la composition de certains minéraux tels que la barytine.

Béryllium (Be^{2+}) : Cet élément métallique entre dans la composition de divers silicates : béryl, tourmaline, …

Bore (B^{3+}) : C'est un métalloïde se combinant facilement avec S, C, Al et réduisant les oxydes métalliques. Il entre dans la composition de quelques silicates (tourmaline,…), des filons acides, …

Cadmium (Cd^{2+}) : C'est un élément métallique qui est surtout associé à Zn (blende ZnS et autres minerais de zinc), et en est extrait avec celui-ci.

Cobalt (Co^{3+}) : Cet élément métallique entre dans la composition de divers silicates (olivine, biotite,…), et se trouve surtout dans les roches basiques et ultra-basiques.

Chrome (Cr^{3+}) : C'est un cation métallique assez abondant dans des roches magmatiques ultra-basiques (amphiboles, pyroxènes,…). On le trouve en trace dans divers silicates (muscovite, pyroxène, chlorite,…). Dans les eaux naturelles, le chrome est présent au degré d'oxydation III, sous les formes Cr^{3+}, $CrOH^{2+}$, ou $Cr(OH)_2^+$ en fonction du pH. La forme toxique du chrome est le Cr(VI), de degré d'oxydation VI, dont la présence dans les eaux naturelles est révélatrice d'une pollution.

Cuivre (Cu^{2+}) : C'est un élément métallique trace des roches magmatiques. La présence de fortes teneurs en cuivre est généralement signe de pollution d'origine anthropique, par le lessivage des zones viticoles suite au traitement des vignes au sulfate de cuivre. Elle peut aussi être le signe d'attaque des canalisations constituées d'alliage laiton par des eaux agressives.

Cyanure (CN^-) : Il forme l'acide cyanhydrique CNH.

Fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}) : La teneur en fer dissous est fortement liée au pH et à la teneur en oxygène dissous dans l'eau, une eau chargée en oxygène favorisant en particulier la formation de précipités d'oxydes de fer $Fe(OH)_{3(solide)}$ (dépôts de rouille). Dans les échantillons d'eaux souterraines, les fortes teneurs en fer pourraient être dues également à la corrosion par des eaux agressives des pièces métalliques de l'équipement des forages.

Fluorures (F^-) : L'eau de mer en contient environ 1,3 mg/l. Les fluorures sont des éléments trace qui peuvent avoir une origine géologique : on trouve le fluor F dans de nombreux minéraux où ils se substitue à O ou OH, et sous forme de fluorures. Un des fluorures particulier est la fluorine CaF_2, présente dans les roches magmatiques alcalines (granites, syénites), et dans les filons avec barytine ($BaSO_4$), blende (ZnS), galène (PbS), calcite et quartz.

Lithium (Li^+) : C'est un élément métallique qui se trouve dans divers silicates. Il est caractéristiques des eaux minérales, on ne le rencontre pas dans les eaux « banales ».

Manganèse (Mn^{2+}) : Les équilibres chimiques du manganèse sont étroitement liés à ceux du fer. La présence de fer et de manganèse en teneur excessive dans les eaux souterraines peut générer des dépôts dans les ouvrages de captage (précipitation d'oxyde de manganèse MnO2(solide) et d'oxydes de fer), et dégrader les réseaux, le développement de bactéries entraînant la corrosion et le colmatage des équipements. A de trop fortes concentrations, le manganèse est néfaste pour l'homme, car il peut favoriser des maladies du système nerveux.

Mercure (Hg^{2+}) : C'est un élément métallique trace que l'on trouve souvent sous forme de sulfures (son principal minerai est le cinabre HgS), plus rarement sous forme d'oxydes ou de chlorures. Les émissions de mercure proviennent principalement de la production d'énergie (combustibles fossiles), de son extraction à partir de minerais, et de la combustion de déchets. Le mercure est fortement volatile, et fortement toxique.

Nickel (Ni^{2+}) : C'est un élément métallique, qui se substitue à Fe ou Mg dans divers silicates (en particulier dans les péridots et les pyroxènes des roches magmatiques basiques. Il existe également sous forme de sulfures, d'arséniures et d'arsénates, de sulfates, de carbonates, etc. Ces minéraux, associés en général à d'autres métaux, se trouvent dans des gîtes liés à des massifs de roches magmatiques et dans des filons.

Phosphore (P), Phosphates (PO_4^{3-}) : Le phosphore se présente sous une grande diversité de formes : soluble, particulaire,… Dans les eaux souterraines, diverses formes oxydées du phosphore peuvent être rattachées à l'orthophosphate, et les méthodes d'analyse ne permettent pas de les séparer. L'acide orthophosphorique H_3PO_4 peut s'ioniser de différentes façons. Dans les eaux naturelles de pH compris entre 5 et 8, les formes $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} prédominent. A pH basiques, la forme phosphates PO_4^{3-} est prédominante. La concentration du phosphore d'origine naturelle (fond géochimique) dans les nappes ne dépasse généralement pas 0,05 mg/l. Des concentrations plus élevées sont signe de pollutions anthropiques : épandages d'engrais chimiques minéraux ou organiques (fumier, lisiers), défauts de réseaux d'assainissement individuel ou collectif, polyphosphates des lessives.

Plomb (Pb^{4+}) : C'est un élément métallique qui se trouve dans les silicates (associé à Ca, Fe, Mn), dans les sulfures, et dans de nombreux sulfates, phosphates, carbonates. C'est un élément toxique qui peut entraîner le saturnisme.

Sélénium (Se^{4+}) : C'est un élément métallique trace. Dans les roches, il est le plus souvent associé au soufre, auquel il peut se substituer en partie dans des sulfures (pyrite FeS_2 en particulier), ou en totalité pour donner des produits séléniés avec le plomb, le fer, le cuivre, le zinc,… Il est potentiellement cancérigène.

Soufre (S^{2-}) : Le soufre natif est jaune citron, et est présent dans des dépôts soit fumerolliens, soit liés à des sources thermales.

Strontium (Sr^{2+}) : C'est un élément métallique qui se trouve dans divers minéraux (carbonates, sulfates, phosphates), et en particulier dans la strontianite $SrCO_3$, et la célestite $SrSO_4$, présentes dans les filons hydrothermaux.

Zinc (Zn^{2+}) : Le zinc, comme le cuivre, est un élément métallique trace des roches magmatiques. On peut le retrouver dans des eaux oxygénées riches en fer et en manganèse. Le zinc peut être d'origine anthropique, par le lessivage de zones urbanisées et industrialisées.

Annexe 3 - Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 « relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles »

Art. 55. – Le présent décret pourra être modifié par décret en Conseil d'Etat, à l'exception des articles 16, 32, 40, 46 et 49 qui, en application des dispositions du décret du 15 janvier 1997 susvisé, doivent être pris en conseil des ministres.

Art. 56. – Le Premier ministre, la ministre de l'emploi et de la solidarité, le ministre de l'équipement, des transports et du logement, le ministre de l'agriculture et de la pêche, le ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, le ministre de la fonction publique et de la réforme de l'Etat et le ministre délégué à la santé sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 20 décembre 2001.

JACQUES CHIRAC

Par le Président de la République :

Le Premier ministre,
LIONEL JOSPIN

La ministre de l'emploi et de la solidarité,
ÉLISABETH GUIGOU

Le ministre de l'équipement, des transports et du logement,
JEAN-CLAUDE GAYSSOT

Le ministre de l'agriculture et de la pêche,
JEAN GLAVANY

Le ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement,
YVES COCHET

Le ministre de la fonction publique et de la réforme de l'Etat,
MICHEL SAPIN

Le ministre délégué à la santé,
BERNARD KOUCHNER

ANNEXE I

LIMITES ET RÉFÉRENCES DE QUALITÉ

I-1. Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Partie A. – *Paramètres microbiologiques*

Les eaux de distribution doivent respecter les valeurs suivantes :

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ (nombre/100 ml)
Escherichia coli (E. coli)	0
Entérocoques	0

Les eaux vendues en bouteilles ou en conteneurs doivent respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites suivantes à l'exception des eaux de source préemballées pour lesquelles les limites sont celles fixées par l'article 14 *bis* et par le I-3 de l'annexe I du décret n° 89-369 du 6 juin 1989 modifié :

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ
Escherichia coli (E. coli)	0/250 ml
Entérocoques	0/250 ml
Pseudomonas aeruginosa *	0/250 ml
Numération de germes aérobies revivifiables à 22 °C **	100/ml
Numération de germes aérobies revivifiables à 37 °C **	20/ml
Bactéries sulfito-réductrices, y compris les spores	0/50 ml

* Les analyses doivent être commencées au moins 3 jours après le conditionnement.
** Les analyses doivent être commencées dans les 12 heures suivant le conditionnement.

Partie B. – *Paramètres chimiques*

Les eaux doivent respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites de qualité définies ci-après :

PARAMÈTRES	LIMITE DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Acrylamide.	0,10	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Antimoine.	5,0	µg/l	
Arsenic.	10	µg/l	
Baryum.	0,7	mg/l	
Benzène.	1,0	µg/l	
Benzo[a]pyrène.	0,010	µg/l	
Bore.	1,0	mg/l	
Bromates.	10	µg/l	La valeur la plus faible possible inférieure à cette limite doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité (cf. articles 50 et 53), la concentration de bromates dans les eaux destinées à la consommation humaine.
Cadmium.	5,0	µg/l	
Chrome.	50	µg/l	
Chlorure de vinyle.	0,5	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.

PARAMÈTRES	LIMITE DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Cuivre.	2,0	mg/l	
Cyanures totaux.	50	µg/l	
1,2-dichloroéthane.	3,0	µg/l	
Epichlorhydrine.	0,10	µg/l	La limite de qualité se réfère à la concentration résiduelle en monomères dans l'eau, calculée conformément aux spécifications de la migration maximale du polymère correspondant en contact avec l'eau.
Fluorures.	1,5	mg/l	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques.	0,1	µg/l	Pour la somme des composés suivants : benzo[b]fluoranthène, benzo[k]-fluoranthène, benzo[ghi]pérylène, indéno[1,2,3-cd]pyrène.
Mercure total.	1,0	µg/l	
Microcystine-LR.	1	µg/l	A rechercher en cas de prolifération algale dans les eaux brutes.
Nickel.	20	µg/l	
Nitrates.	50 De plus la somme de la concentration en nitrates divisée par 50 et de celle en nitrites divisée par 3 doit rester inférieure à 1.	mg/l	
Nitrites.	0,50 0,1	mg/l mg/l	En sortie des installations de traitement, la concentration en nitrites doit être inférieure ou égale à 0,1mg/l. Pour les eaux conditionnées.
Pesticides.	0,10 Pour chaque pesticide sauf aldrine, dieldrine, heptachlore, heptachloré-poxyde : 0,03.	µg/l µg/l	Par « pesticides » on entend : – les insecticides organiques ; – les herbicides organiques ; – les fongicides organiques ; – les nématocides organiques ; – les acaricides organiques ; – les algicides organiques ; – les rodenticides organiques ; – les produits antimoisissures organiques ; – les produits apparentés (notamment les régulateurs de croissance) et leurs métabolites, produits de dégradation et de réaction pertinents.
Total pesticides.	0,50	µg/l	Par « total pesticides », on entend la somme de tous les pesticides individualisés détectés et quantifiés.
Plomb.	10	µg/l	Les mesures appropriées pour réduire progressivement la concentration en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité sont précisées aux articles 33 et 36 (arrêté d'application) du présent décret. Lors de la mise en œuvre des mesures destinées à atteindre cette valeur, la priorité est donnée aux cas où les concentrations en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine sont les plus élevées.
Sélénium.	10	µg/l	
Tétrachloroéthylène et Trichloroéthylène.	10	µg/l	Somme des concentrations des paramètres spécifiés.
Total trihalométhanes (THM).	100	µg/l	La valeur la plus faible possible inférieure à cette valeur doit être visée sans pour autant compromettre la désinfection. Par Total trihalométhanes on entend la somme de : chloroforme, bromoforme, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane. Toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité (cf. articles 50 et 53), la concentration de THM dans les eaux destinées à la consommation humaine.
Turbidité.	1	NFU	La limite de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article 25 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la limite de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement. Pour les installations qui sont d'un débit inférieur à 1 000 m³/j ou qui desservent des unités de distribution de moins de 5 000 habitants, toutes les mesures appropriées doivent être prises pour réduire le plus possible la turbidité, au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité.

I-2. Références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine

I-2.1. Paramètres indicateurs de qualité témoins du fonctionnement des installations de production et de distribution d'eau

Le dépassement des valeurs ou intervalles suivants entraîne, selon le cas, l'application des dispositions prévues aux articles 13, 21, 22, 23, 39.

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Aluminium total.	200	µg/l	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude pour lesquelles la valeur de 0,5 mg/l (Al) ne doit pas être dépassée.
Ammonium.	0,1	mg/l	S'il est démontré que l'ammonium a une origine naturelle, la valeur à respecter est de 0,5mg/l pour les eaux souterraines.
Bactéries coliformes.	0	/100 ml	
	0	/250 ml	Pour les eaux mises en bouteilles ou en conteneurs.
Chlore libre et total.			Absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal.
Cuivre.	1	mg/l	
Chlorites.	0,2	mg/l	Sans compromettre la désinfection, la valeur la plus faible possible doit être visée.
Chlorures.	250	mg/l	Les eaux ne doivent pas être agressives.
Bactéries sulfito-réductrices y compris les spores.	0	nombre /100 ml	Ce paramètre doit être mesuré lorsque l'eau est d'origine superficielle ou influencée par une eau d'origine superficielle. En cas de non-respect de cette valeur, une enquête doit être menée sur la distribution d'eau pour s'assurer qu'il n'y a aucun danger potentiel pour la santé humaine résultant de la présence de micro-organismes pathogènes, par exemple des cryptosporidium.
Couleur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment une couleur inférieure ou égale à 15.	mg/l de platine en référence à l'échelle Pt/Co.	
Conductivité.	180 ≤ ≥ 1 000	µS/cm à 20 °C	Les eaux ne doivent pas être corrosives.
	2 500	µS/cm à 20 °C	Pour les eaux conditionnées.
Concentration en ions hydrogène.	≥ 6,5 et ≤ 9	Unités pH	Les eaux ne doivent pas être agressives.
	≥ 4,5 et ≤ 9	Unités pH	Pour les eaux plates mises en bouteilles ou en conteneurs.
	< 9	Unités pH	Pour les eaux mises en bouteilles ou en conteneurs qui sont naturellement riches ou enrichies artificiellement avec du dioxyde de carbone.
Carbone organique total (COT).	Aucun changement anormal 2	mg/l	Ce paramètre doit être mesuré pour les unités de distribution desservant au moins 5 000 habitants.
Equilibre calcocarbonique.	Les eaux ne doivent pas être agressives		
Fer total.	200	µg/l	
Manganèse.	50	µg/l	
Numération de germes aérobies revivifiables à 22 °C et à 37 °C.			Variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle.
Oxydabilité au permanganate de potassium mesurée après 10 minutes en milieu acide.	5,0	mg/l O_2	Ce paramètre doit être recherché lorsque le COT n'est pas analysé.
Odeur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C.		

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Saveur.	Acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25 °C.		
Sodium.	200	mg/l	
Sulfates.	250	mg/l	
Température.	25	°C	A l'exception des eaux ayant subi un traitement thermique pour la production d'eau chaude. Cette valeur ne s'applique pas dans les départements d'outre-mer.
Turbidité.	0,5	NFU	La référence de qualité est applicable au point de mise en distribution, pour les eaux visées à l'article 25 et pour les eaux d'origine souterraine provenant de milieux fissurés présentant une turbidité périodique importante et supérieure à 2 NFU. En cas de mise en œuvre d'un traitement de neutralisation ou de reminéralisation, la référence de qualité s'applique hors augmentation éventuelle de turbidité due au traitement.
	2	NFU	La référence de qualité s'applique aux robinets normalement utilisés.

1-2.2. *Indicateurs de radioactivité*

PARAMÈTRES	RÉFÉRENCES DE QUALITÉ	UNITÉ	NOTES
Dose totale indicative (DTI).	0,10	mSv/an	Le calcul de la DTI est effectué selon les modalités définies à l'article 15 du présent décret.
Tritium.	100	Bq/l	La présence de concentrations élevées de tritium dans l'eau peut être le témoin de la présence d'autres radionucléides artificiels. Si la concentration en tritium dépasse le niveau de référence, il est procédé à la recherche de la présence éventuelle de radionucléides artificiels.

I-3. Limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine

Les eaux doivent respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites suivantes ou être comprises dans les intervalles suivants sauf pour le taux de saturation en oxygène dissous.

G : valeur guide ; I : valeur limite impérative.

GROUPES DE PARAMÈTRES	PARAMÈTRES	A 1		A 2		A 3	
		G	I	G	I	G	I
Paramètres organoleptiques.	Coloration (après filtration simple) mg/l (échelle Pt)	10	20	50	100	50	200
	Odeur (facteur de dilution à 25 °C)	3		10		20	
Paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle des eaux.	Conductivité µS/cm à 20 °C	1 000		1 000		1 000	
	Température (°C)	22	25	22	25	22	25
	pH (unités pH)	6,5-8,5		5,5-9		5,5-9	
	Chlorures (mg/l Cl)	200		200		200	
	Sulfates (mg/l SO_4)	150	250	150	250	150	250
	Matières en suspension (mg/l)	25					
	Demande biochimique en oxygène (DBO_5) à 20 °C sans nitrification (mg/l O_2)	< 3		< 5		< 7	
	Demande chimique en oxygène (DCO) (mg/l O_2)					30	
	Taux de saturation en oxygène dissous (% O_2)	> 70		> 50		> 30	
Paramètres concernant les substances indésirables.	Nitrates (mg/l NO_3)	25	50		50		50
	Ammoniaque (mg/l NH_4)	0,05		1	1,5	2	4
	Azote Kjeldhal (NO_3, excepté (mg/l de N)	1		2		3	
	Hydrocarbures dissous ou émulsionnés après extraction (mg/l)		0,05		0,2	0,5	1
	Phénols (indice phénol) paranitraniline 4-aminoantipyrine (mg/l C_6H_5OH)		0,001	0,001	0,005	0,01	0,1
	Agents de surface réagissant au bleu de méthylène (mg/l lauryl-sulfate)	0,2		0,2		0,5	
	Substances extractibles au chloroforme (mg/l)	0,1		0,2		0,5	

GROUPES DE PARAMÈTRES	PARAMÈTRES	A 1		A 2		A 3	
		G	I	G	I	G	I
	Fer dissous (mg/l Fe)	0,1	0,3	1	2	1	
	Manganèse (mg/l Mn)	0,05		0,1		1	
	Cuivre (mg/l Cu)	0,02	0,05	0,05		1	
	Zinc (mg/l Zn)	0,5	3	1	5	1	5
	Phosphore (mg/l P_2O_5)	0,4		0,7		0,7	
	Fluor (mg/l F)	0,7-1	1,5	0,7-1,7		0,7-1,7	
	Bore (mg/l B)	1		1		1	
	Baryum (mg/l Ba)		0,7		1		1
Paramètres concernant les substances toxiques.	Arsenic µg/l As)		10		50	50	100
	Cadmium µg/l Cd)	1	5	1	5	1	5
	Cyanures µg/l CN)		50		50		50
	Chrome total µg/l Cr)		50		50		50
	Plomb µg/l Pb)		10		50		50
	Mercure µg/l Hg)	0,5	1	0,5	1	0,5	1
	Sélénium µg/l Se)		10		10		10
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques Total 6 substances précisées en annexe III (µg/l)		0,2		0,2		1
Pesticides.	Total		0,5[2]		0,5[2]		5
	Par substances individualisées		0,1[1,2]		0,1[1,2]		2
Paramètres microbiologiques.	Coliformes totaux 37 °C (100 ml)	50		5 000		50 000	
	Escherichia coli (100 ml)	20		2 000		20 000	
	Entérocoques (100 ml)	20		1 000		10 000	
	Salmonelles	Abs dans 5 000 ml		Abs dans 1 000 ml			

Note 1 : Pour l'aldrine, la dieldrine, l'heptachlore et l'heptachlorepoxyde, la limite de qualité est de 0,03 µg/l.
Note 2 : Ces valeurs ne concernent que les eaux superficielles utilisées directement, sans dilution préalable.
En cas de dilution, il peut être fait appel à des eaux de qualités différentes, le taux de dilution devant être calculé au cas par cas.

ANNEXE II

CONTRÔLE ET PROGRAMMES D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS D'EAU

La présente annexe fixe les programmes d'analyses d'échantillons, pour les eaux fournies par un réseau de distribution (II-1), pour les eaux conditionnées, la glace alimentaire et les eaux utilisées dans les industries alimentaires non raccordées (II-2) ainsi que les modalités d'adaptation de ces programmes d'analyse (II-3).

II-1. **Eaux fournies par un réseau de distribution** (Art. 3, *a*)

Les échantillons doivent être prélevés de manière à être représentatifs (temporellement tout au long de l'année et géographiquement) de la qualité des eaux consommées.

Partie A. – *Contenu des analyses*

Le tableau I fixe le contenu des analyses types (RS, RP, P1, P2, D1, D2) à effectuer sur les échantillons d'eau prélevés soit :
- au niveau de la ressource ;
- au point de mise en distribution. La qualité de l'eau, en ce point, est considérée comme représentative de la qualité de l'eau sur le réseau de distribution d'une zone géographique déterminée, où les eaux proviennent d'une ou plusieurs sources et à l'intérieur de laquelle la qualité peut être considérée comme uniforme. Ce réseau est appelé « unité de distribution » ;
- aux robinets normalement utilisés par le consommateur.

RS correspond au programme d'analyse effectué à la ressource pour les eaux d'origine superficielle.
RP correspond au programme d'analyse effectué à la ressource pour les eaux d'origine souterraine ou profonde.
P1 correspond au programme d'analyse de routine effectué au point de mise en distribution.
P2 correspond au programme d'analyse complémentaire de P1 permettant d'obtenir le programme d'analyse complet (P1 + P2) effectué au point de mise en distribution.
D1 correspond au programme d'analyse de routine effectué aux robinets normalement utilisés pour la consommation humaine.
D2 correspond au programme d'analyse complémentaire de D1 permettant d'obtenir le programme d'analyse complet (D1 + D2) effectué aux robinets normalement utilisés pour la consommation humaine.

Annexe 4 - Directive 2003/40/CE de la Commission du 16 mai 2003, « fixant la liste, les limites de concentration et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source »

L 126/34 FR Journal officiel de l'Union européenne 22.5.2003

DIRECTIVE 2003/40/CE DE LA COMMISSION

du 16 mai 2003

fixant la liste, les limites de concentration et les mentions d'étiquetage pour les constituants des eaux minérales naturelles, ainsi que les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour le traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source

LA COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES,

vu le traité instituant la Communauté européenne,

vu la directive 80/777/CEE du Conseil du 15 juillet 1980 relative au rapprochement des législations des États membres concernant l'exploitation et la mise dans le commerce des eaux minérales naturelles ([1]), modifiée en dernier lieu par la directive 96/70/CE du Parlement européen et du Conseil ([2]), et notamment son article 11, paragraphe 1,

considérant ce qui suit:

(1) Des constituants peuvent être présents à l'état naturel dans certaines eaux minérales naturelles du fait de leur origine hydrogéologique et présenter un risque pour la santé publique à partir d'une certaine concentration. Il apparaît donc nécessaire d'établir des limites de concentration pour ces constituants dans les eaux minérales naturelles.

(2) La directive 80/777/CEE prévoit à l'article 11 la possibilité d'adopter des limites de concentration harmonisées pour les constituants des eaux minérales naturelles après consultation du comité scientifique pour l'alimentation humaine, ainsi que des mentions d'étiquetage pour indiquer, le cas échéant, la présence de certains constituants à des concentrations élevées.

(3) Le comité scientifique pour l'alimentation humaine a rendu un avis ([3]) sur l'arsenic, le baryum, le fluor, le bore et le manganèse et a validé, pour d'autres constituants des eaux minérales naturelles, les limites recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'eau potable.

(4) La norme du Codex «eaux minérales naturelles» ([4]) révisée établit à des fins sanitaires une liste de constituants et de limites maximales pour ces constituants. Elle a été adoptée sur la base des données scientifiques internationales les plus récentes et assure une protection suffisante de la santé publique.

(5) Il est généralement admis que l'apport alimentaire de fluor à faible dose peut avoir une action bénéfique sur la dentition. À l'inverse, un apport global de fluor trop élevé peut engendrer des effets néfastes sur la santé publique. Il convient donc de prévoir une limite maximale harmonisée pour le fluor dans les eaux minérales naturelles qui permette une protection suffisante de la population dans son ensemble.

(6) L'OMS a recommandé une valeur guide pour le fluor pour l'eau potable et le comité scientifique pour l'alimentation humaine l'a validée pour les eaux minérales naturelles dans l'avis précité. Afin de protéger les nourrissons et les jeunes enfants qui constituent la population la plus sensible par rapport au risque de fluorose, il convient en outre de prévoir une mention d'étiquetage pour les eaux dont la teneur en fluor est supérieure à cette valeur guide, qui soit facilement visible par le consommateur.

(7) Le comité scientifique pour l'alimentation humaine a indiqué une valeur guide pour le bore dans les eaux minérales naturelles sur la base des recommandations de l'OMS ([5]) de 1996. Cependant, l'OMS et d'autres organisations scientifiques reconnues au plan international ont procédé depuis lors à de nouvelles évaluations de l'effet du bore sur la santé publique et ont recommandé des valeurs supérieures. Il convient donc de consulter l'Autorité européenne de sécurité des aliments sur le bore dans les eaux minérales naturelles pour tenir compte des nouvelles évaluations scientifiques disponibles et de ne pas prévoir de limite maximale pour le bore à ce stade.

(8) Le comité scientifique pour l'alimentation humaine a également indiqué le niveau acceptable pour le baryum, le manganèse et l'arsenic dans les eaux minérales naturelles. Pour les autres constituants, la norme révisée du Codex prévoit des limites maximales qui assurent une protection suffisante de la santé publique. Cependant la limite pour les nitrites apparaît trop basse aux vues des données disponibles et devrait être alignée sur celle prévue pour l'eau potable ([6]).

(9) La limite maximale prévue par la norme du Codex pour les nitrates permet d'assurer une protection suffisante de la santé publique et doit servir de référence pour les échanges communautaires et internationaux d'eaux minérales naturelles. Toutefois, dans le cadre de la procédure de reconnaissance officielle des sources d'eaux minérales naturelles prévue à l'article 1er de la directive précitée, les autorités compétentes des États membres doivent pouvoir se référer, pour les eaux minérales naturelles captées sur leur territoire, à une valeur guide plus basse pour les nitrates.

(10) Les eaux minérales naturelles, dont les teneurs en certains constituants dépassent les limites maximales pour ces constituants doivent, à des fins de santé publique, faire l'objet de traitements de séparation de ces constituants. Afin de permettre aux opérateurs de réaliser les investissements nécessaires pour se conformer à ces nouvelles normes, il convient de prévoir des délais suffisants avant l'entrée en application des limites maximales de concentration pour ces constituants, en particulier pour le fluor et le nickel pour lesquels aucun traitement de séparation n'a encore fait l'objet d'une évaluation, ni d'une autorisation au niveau communautaire.

([1]) JO L 229 du 30.8.1980, p. 1.
([2]) JO L 299 du 23.11.1996, p. 26.
([3]) Avis sur l'arsenic, le barium, le fluor, le bore et le manganèse dans les eaux minérales naturelles du 13 décembre 1996.
([4]) CODEX STAN 108-1981, REV 1-1997, révisée lors de la septième session du CCNMW (octobre 2000).
([5]) OMS (1996): lignes directrices sur la qualité de l'eau de boisson, deuxième édition, volume 2.
([6]) Directive 98/83/CE du Conseil (JO L 330 du 5.12.1998, p. 32).

(11) Aux fins des contrôles officiels de ces constituants, il est nécessaire de prévoir une marge de fluctuation des résultats analytiques autour des limites maximales de concentration qui corresponde aux incertitudes de mesure.

(12) La directive 80/777/CEE modifiée prévoit à son article 4, paragraphe 1, point b), la possibilité de séparer le fer, le manganèse, le soufre et l'arsenic de certaines eaux minérales naturelles par un traitement à l'air enrichi en ozone, sous réserve de l'évaluation de ce traitement par le comité scientifique pour l'alimentation humaine et de l'adoption des conditions d'utilisation par le comité permanent de la chaîne alimentaire et de la santé animale.

(13) Le comité scientifique pour l'alimentation humaine a rendu un avis [1] sur les conditions d'utilisation de ce traitement qui prévoit à la fois des obligations de moyens et de résultats. Toutefois, il apparaît approprié de définir uniquement des obligations de résultats afin de tenir compte de l'évolution des techniques de traitement à l'air enrichi en ozone et de la variabilité des caractéristiques du traitement selon la composition physico-chimique de l'eau à traiter.

(14) En outre, le traitement à l'air enrichi en ozone ne doit pas modifier la composition en constituants caractéristiques, au sens de l'article 7, paragraphe 2, point a), de la directive 80/777/CEE, ni avoir une action de désinfection au sens de son article 4, paragraphe 3, ni générer la formation de résidus de traitement pouvant avoir un effet néfaste sur la santé publique.

(15) En application de l'article 7, paragraphe 2, point c), de la directive précitée, l'étiquetage des eaux minérales naturelles traitées à l'air enrichi en ozone doit comporter une mention d'étiquetage qui informe suffisamment les consommateurs du traitement réalisé.

(16) Conformément aux dispositions de l'article 9, paragraphe 4 *bis*, quatrième tiret, de la directive 80/777/CEE, les dispositions concernant les traitements prévus à son article 4 et en particulier, le traitement à l'air enrichi en ozone sont applicables aux eaux de source.

(17) Les mesures prévues à la présente directive sont conformes à l'avis du comité permanent de la chaîne alimentaire et de la santé animale,

A ARRÊTÉ LA PRÉSENTE DIRECTIVE:

Article premier

La présente directive établit la liste des constituants des eaux minérales naturelles pouvant présenter un risque pour la santé publique, les limites pour les teneurs admissibles pour ces constituants, les délais d'application pour ces limites et les mentions d'étiquetage pour certains constituants. Ces constituants doivent être naturellement présents dans l'eau et ne doivent pas résulter d'une contamination éventuelle de la source.

Cette directive définit aussi les conditions d'utilisation de l'air enrichi en ozone pour la séparation des composés du fer, du manganèse, du soufre et de l'arsenic des eaux minérales naturelles et des eaux de source, et la mention d'étiquetage que doivent comporter les eaux qui ont fait l'objet de ce traitement.

Article 2

1. Les eaux minérales naturelles doivent, au moment de leur conditionnement, être conformes au plus tard le 1er janvier 2006, aux limites maximales de concentration prévues à l'annexe I pour les constituants figurant dans cette annexe.

2. Toutefois, dans le cas des fluorures et du nickel, le délai visé au paragraphe 1 est porté au 1er janvier 2008.

3. Par dérogation au paragraphe 1 et dans le cadre de la procédure de reconnaissance officielle pour les eaux minérales naturelles captées sur leur territoire, les autorités compétentes des États membres peuvent se référer à une valeur guide plus basse pour les nitrates et les nitrites, sous réserve qu'une même valeur guide soit appliquée à toutes les demandes qui leur sont soumises.

Article 3

Aux fins des contrôles officiels, les États membres respectent les spécifications figurant à l'annexe II pour l'analyse des constituants listés à l'annexe I.

Article 4

1. Les eaux minérales naturelles dont la concentration en fluor est supérieure à 1,5 milligramme par litre (mg/l) doivent comporter la mention d'étiquetage «contient plus de 1,5 mg/l de fluor: ne convient pas aux nourrissons et aux enfants de moins de 7 ans pour une consommation régulière».

2. La mention d'étiquetage prévue au paragraphe 1 du présent article doit figurer à proximité immédiate de la dénomination de vente et en caractères nettement visibles.

3. Les eaux minérales naturelles, qui en application du paragraphe 1 du présent article, font l'objet d'une mention d'étiquetage, doivent comporter l'indication de la teneur réelle en fluor au niveau de la composition physico-chimique en constituants caractéristiques, prévue à l'article 7, paragraphe 2, point a), de la directive 80/777/CEE.

Article 5

1. Sans préjudice des dispositions de l'article 4, paragraphe 1, point b) de la directive 80/777/CEE, la mise en œuvre du traitement des eaux minérales naturelles avec de l'air enrichi en ozone doit faire l'objet d'une notification préalable aux autorités compétentes qui s'assurent que:

a) le recours à un tel traitement est justifié du fait de la composition de l'eau en composés du fer, du manganèse, du soufre ainsi que de l'arsenic;

[1] Avis du Comité scientifique pour l'alimentation humaine du 7 juin 1996 sur l'utilisation de l'ozone pour la séparation d'éléments instables tels que le fer, le manganèse et l'arsenic des eaux minérales naturelles.

b) l'opérateur prend toutes les mesures nécessaires pour garantir l'efficacité et l'innocuité du traitement et pour permettre son contrôle par les autorités compétentes.

2. Le traitement des eaux minérales naturelles à l'air enrichi en ozone doit satisfaire à l'ensemble des conditions suivantes:

a) la composition physico-chimique des eaux minérales naturelles en constituants caractéristiques n'est pas modifiée par le traitement;

b) l'eau minérale naturelle avant traitement respecte les critères microbiologiques définis à l'article 5, paragraphes 1 et 2 de la directive 80/777/CEE;

c) le traitement ne conduit pas à la formation de résidus pouvant présenter un risque pour la santé publique ou en concentration supérieure aux limites maximales établies à l'annexe III.

Article 6

En application de l'article 7, paragraphe 2, point c), de la directive 80/777/CEE, l'étiquetage des eaux minérales naturelles qui ont fait l'objet d'un traitement avec de l'air enrichi en ozone, doit comporter, à proximité de l'indication de la composition analytique en constituants caractéristiques, la mention «eau soumise à une technique d'oxydation autorisée à l'air ozoné».

Article 7

Sans préjudice des dispositions de l'article 9, paragraphe 4 *ter* de la directive 80/777/CEE, les dispositions des articles 5 et 6 de la présente directive sont applicables aux eaux de source.

Article 8

1. Les États membres prennent les mesures nécessaires pour permettre la mise sur le marché des produits conformes à la présente directive à partir du 1er janvier 2004.

2. Sans préjudice des délais prévus à l'article 2, paragraphes 1 et 2, les États membres interdisent la commercialisation des produits non conformes à la présente directive à partir du 1er juillet 2004. Toutefois, les produits conditionnés et étiquetés avant le 1er juillet 2004 peuvent être écoulés jusqu'à épuisement des stocks.

Article 9

Les États membres mettent en vigueur les dispositions législatives, réglementaires et administratives nécessaires pour se conformer à la présente directive au plus tard le 31 décembre 2003. Ils en informent immédiatement la Commission.

Lorsque les États membres adoptent ces dispositions, celles-ci contiennent une référence à la présente directive ou sont accompagnées d'une telle référence lors de leur publication officielle. Les modalités de cette référence sont arrêtées par les États membres.

Article 10

La présente directive entre en vigueur le vingtième jour suivant celui de sa publication au *Journal officiel de l'Union européenne*.

Article 11

Les États membres sont destinataires de la présente directive.

Fait à Bruxelles, le 16 mai 2003.

Par la Commission
David BYRNE
Membre de la Commission

22.5.2003 FR Journal officiel de l'Union européenne L 126/37

ANNEXE I

Constituants naturellement présents dans les eaux minérales naturelles et limites maximales dont le dépassement peut présenter un risque pour la santé publique

Constituants	Limites maximales (mg/l)
Antimoine	0,0050
Arsenic	0,010 (total)
Baryum	1,0
Bore	P.M. (*)
Cadmium	0,003
Chrome	0,050
Cuivre	1,0
Cyanures	0,070
Fluorures	5,0
Plomb	0,010
Manganèse	0,50
Mercure	0,0010
Nickel	0,020
Nitrates	50
Nitrites	0,1
Sélénium	0,010

(*) La limite maximale pour le bore sera fixée si nécessaire, après avis de l'Autorité européenne de sécurité des aliments et sur proposition de la Commission avant le 1er janvier 2006.

L 126/38 FR Journal officiel de l'Union européenne 22.5.2003

ANNEXE II

Caractéristiques (*) de performance pour l'analyse des constituants de l'annexe I

Constituants	Exactitude en % de la valeur paramétrique (note 1)	Précision de la valeur paramétrique (note 2)	Limite de détection en % de la valeur paramétrique (note 3)	Notes
Antimoine	25	25	25	
Arsenic	10	10	10	
Baryum	25	25	25	
Bore				Voir annexe I
Cadmium	10	10	10	
Chrome —	10	10	10	
Cuivre	10	10	10	
Cyanures	10	10	10	Note 4
Fluorures	10	10	10	
Plomb	10	10	10	
Manganèse	10	10	10	
Mercure	20	10	20	
Nickel	10	10	10	
Nitrates	10	10	10	
Nitrite	10	10	10	
Sélénium	10	10	10	

(*) Les méthodes d'analyse servant à mesurer les concentrations des constituants de l'annexe I doivent pouvoir mesurer, au minimum, des concentrations égales à la valeur paramétrique avec une exactitude, une précision et une limite de détection spécifiées. Quelle que soit la sensibilité de la méthode d'analyse employée, le résultat est exprimé en utilisant au moins le même nombre de décimales que pour la limite maximale prévue à l'annexe I.

Note 1: L'exactitude est l'erreur systématique et est la différence entre la valeur moyenne du grand nombre de mesures répétées et la valeur exacte.

Note 2: La précision est l'erreur aléatoire et est exprimée en général comme l'écart type (à l'intérieur du lot et entre les lots) de l'éventail des résultats sur la moyenne). Une précision acceptable est égale à deux fois l'écart type relatif.

Note 3: La limite de détection est:
— soit trois fois l'écart type relatif à l'intérieur du lot d'un échantillon naturel contenant une concentration peu élevée du paramètre,
— soit cinq fois l'écart type relatif à l'intérieur du lot d'un échantillon vierge.

Note 4: La méthode doit permettre de déterminer le cyanure total sous toutes ses formes.

22.5.2003 FR Journal officiel de l'Union européenne L 126/39

ANNEXE III

Limites maximales pour les résidus de traitement des eaux minérales naturelles et des eaux de source à l'air enrichi en ozone

Résidus de traitement	Limites maximales (*) (µg/l)
Ozone dissous	50
Bromates	3
Bromoformes	1

(*) Le respect des limites maximales est contrôlé par les autorités compétentes des États membres au niveau de la mise en bouteilles ou autres conditionnements destinés au consommateur final.

Annexe 5 - Constitution d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'émergence

(Extrait du guide des eaux minérales – DNEMT – Note de service 11/2001)

Le dossier de demande d'autorisation d'exploiter une eau minérale naturelle à l'émergence comprend les éléments suivants :

1. La demande proprement dite indiquant :

1.1 les nom, prénom, domicile, qualité et nationalité du pétitionnaire ou, si la demande est faite au nom d'une société, la raison sociale, la forme juridique et le siège social de celle-ci ainsi que les nom, prénoms, qualité et nationalité du signataire de la demande ;

1.2 l'objet de la demande ;

1.3 le ou les noms des communes et le cas échéant, des lieux-dits où sont situées les sources et les installations principales servant à l'exploitation de l'eau.

1.4 trois propositions de nom, dans l'ordre de préférence, pour chacune des sources parmi lesquels seront choisies leur appellation. Ces noms ne doivent pas comporter d'allégation, d'indication ou de présentation fausse ou de nature à induire en erreur. L'emploi d'une dénomination géographique ou d'un nom déjà attribué est interdit ;

2. Une note de présentation justifiant la demande et comportant une synthèse des éléments du dossier.

3. Les annexes comportant :

3.1 des documents cartographiques :

- à l'échelle 1/100 000 donnant la situation générale des sources,
- à l'échelle 1/25 000 (éventuellement 1/50 000) avec la position des sources de manière à permettre la vérification de leurs coordonnées Lambert,
- à l'échelle 1/1000 ou un extrait cadastral donnant la localisation précise de chaque source. Une échelle différente peut être adoptée pour des raisons pratiques.

3.2 un rapport géologique et hydrogéologique, sur le gisement précisant notamment sa structure ainsi que l'origine et la circulation de l'eau et le cas échéant, du gaz ;

3.3 une note décrivant les travaux de reconnaissance préalables ainsi que ceux réalisés sur chaque source en indiquant les dispositions prises ou prévues pour les ouvrages abandonnés ;

3.4 la description de chaque captage avec coupes géologique et technique de l'ouvrage, ses coordonnées Lambert et son altitude, ainsi que le numéro d'enregistrement des ouvrages dans la banque des données sous sol (numéro BSS) attribué par le BRGM suite à la déclaration faite en application de l'article 131 du code minier ;

3.5 les observations recueillies au cours des essais de débit ainsi que les conditions d'exploitation envisagées en indiquant, compte tenu des variations saisonnières et climatiques, les incidences du débit prélevé sur les autres captages et plus généralement sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux de toute nature ;

3.6 la description des conditions naturelles assurant la protection du gisement de l'eau minérale ainsi que la définition et la justification du périmètre sanitaire d'émergence envisagé pour chaque source en précisant pour ces périmètres, la nature de la maîtrise foncière ;

3.7 un descriptif des équipements d'exploitation ainsi que des dispositifs et des modalités permettant d'assurer le contrôle et la surveillance de la qualité de l'eau et du régime d'exploitation de chaque source. Les équipements suivants semblent indispensables : vannes d'obturation, clapet antiretour, robinet de prélèvement en acier inoxydable, instrumentation pour un suivi en continu avec enregistrement automatique du débit avec compteur totalisateur, de la conductivité, du niveau hydrodynamique de la température ;

3.8 Les résultats du suivi de la qualité de l'eau de chaque source durant le test de qualification, au régime d'exploitation sollicité, sur longue durée (6 mois au moins). Ces résultats comporteront :

- les paramètres suivis en continu (débit, conductivité, niveau hydrodynamique, température …). Les résultats seront également présentés sous forme de graphiques facilitant leur lecture et leur interprétation notamment en ce qui concerne leur stabilité. Sur ces graphiques seront aussi reportés les valeurs relevées par le laboratoire agréé lors de ces interventions mensuelles indiquées ci-après ;

- les analyses physico-chimiques de type CM1[1] réalisées par le laboratoire agréé, au rythme mensuel ;

- les analyses microbiologiques de type BMO et BM1 réalisées par le laboratoire agréé au rythme mensuel.

[1] Le contenu des divers types d'analyses est précisé à la fin de l'annexe.

3.9 les résultats de l'analyse physico-chimique complète de l'eau de chaque source (analyse de type CM2) réalisés par le laboratoire agréé après une période suffisante d'observation de celles-ci permettant de juger de la stabilité des principaux paramètres.

3.10 les résultats d'une analyse de la radioactivité sur l'eau de chaque source (analyse de type RM) ;

3.11 le cas échéant, les résultats d'une analyse isotopique sur l'eau de chaque source (oxygène 18, deutérium, tritium) réalisée par un laboratoire compétent. Ce type d'analyse paraît indispensable pour préciser l'origine de l'eau ;

3.12 une copie des actes établissant la maîtrise foncière sur le périmètre sanitaire de chaque source. Il peut s'agir de droits de propriété ou de servitude de droit privé. Ces actes sont accompagnés d'un extrait de plan cadastral ;

3.13 l'indication de l'usage auquel est destinée l'eau : dans le cas d'une eau devant être conditionnée et si l'exploitant souhaite faire état de propriétés favorables à la santé ou dans le cas d'une eau destinée à être utilisée en établissement thermal, un protocole d'étude pharmacologique, physiologique ou clinique permettant de prouver ses effets favorables à la santé ;

3.14 si le pétitionnaire n'est pas propriétaire de la source ou des installations permettant son exploitation, une copie de la convention lui concédant leur exploitation.

Le cas échéant, le demandeur peut adresser en exemplaire unique, sous pli séparé, les informations dont la diffusion lui apparaît de nature à porter atteinte au droit d'inventeur ou de propriété industrielle.

CONTENU DES DIVERS TYPES D'ANALYSES

A - Analyses microbiologiques

1. Analyse type BMO

- Sur 1 ml d'eau, détermination de la teneur totale en micro-organismes revivifiables à 37°C après 24 h et à 22°C après 72 h,

- Sur 50 ml d'eau, dénombrement des germes anaérobies sporulés sulfito-réducteurs,

- Sur 250 ml d'eau, dénombrement des coliformes totaux (streptocoques fécaux) cultivant à 37°C, des coliformes thermotolérants (Escherichia coli) cultivant à 44,5°C, des streptocoques fécaux (entérocoques) et des Pseudomonas aeruginosa.

L'ensemencement doit se faire dans les 12 heures qui suivent le prélèvement après conservation des échantillons entre 3 et 5 degrés Celsius pendant cette période.

Dans le cas d'une eau minérale naturelle conditionnée, l'ensemencement doit se faire dans les 12 heures qui suivent le conditionnement après conservation des échantillons entre 3 et 5 degrés Celsius pendant cette période. Toutefois, la recherche de Pseudomonas aeruginosa doit se faire, de préférence, dans les 8 jours qui suivent le conditionnement après conservation à température ambiante pendant cette période.

2. Analyse type BM1

- Sur 1 litre d'eau, dénombrement des Légionella.

B - Analyses physico-chimiques

1. Analyse type CM1

- température de l'eau,
- pH,
- conductivité à 25°C,
- les éléments essentiels : hydrogénocarbonates, sulfates, chlorures, calcium, magnésium, sodium, potassium,
- les éléments caractéristiques : fluor, lithium, strontium, fer, manganèse, silice, nitrates, nitrites, l'arsenic.

2. Analyse complète type CM2

- aluminium,
- antimoine,
- arsenic,
- béryllium,
- bromures,
- calcium,
- chlorures,
- composés organo-volatils,
- cuivre,
- dioxyde de carbone,
- fer,
- ammonium,
- argent,
- baryum,
- bore,
- cadmium,
- carbone organique total,
- chrome total,
- conductivité à 25°C,
- cyanures,
- étain,
- fluorures,

- hydrogénocarbonates,
- lithium,
- magnésium,
- manganèse,
- mercure,
- nickel,
- - nitrates,
- nitrites,
- - pesticides et produits apparentés,
- pH,
- - phosphates,
- plomb,
- - potassium,
- sélénium,
- - silice,
- sodium,
- - strontium,
- sulfates,
- - température de l'eau,
- vanadium,
- zinc.
- sulfuration totale et thiosulfates réalisés sur place,
- résidu sec à 180°C et résidu sulfaté,
- hydrocarbures aromatiques polycycliques.

C - Analyses de la radioactivité de l'eau

Analyse type RM

- activité volumique alpha totale,
- activité volumique bêta totale,
- radium 226,
- uranium naturel,
- thorium,
- potassium,
- radon 222.