

R  
LE CONSEIL GÉNÉRAL



*Essonne*

R 40840  
Ministère de l'Economie,  
des Finances et de l'Industrie



Secrétariat  
d'Etat à l'Industrie

DOCUMENT PUBLIC

## *Etude hydrogéologique du plateau de Saclay (Essonne)*

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service Public du BRGM 99-D-094

décembre 1999

R 40840



LE CONSEIL GÉNÉRAL



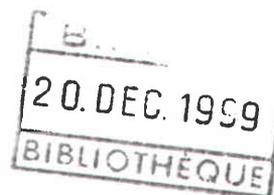
*Essonne*

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



Secrétariat  
d'Etat à l'Industrie

DOCUMENT PUBLIC



## *Etude hydrogéologique du plateau de Saclay (Essonne)*

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service Public du BRGM 99-D-094

décembre 1999  
R 40840



Mots clés : C.E.A., hydrodynamique, hydrogéologie, modélisation, radioactivité, Sables de Fontainebleau, Saclay, transport, tritium

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

Vernoux J.F., Barbier J., Donsimoni M., Seguin J.J., Vairon J. (1999) - Etude hydrogéologique du plateau de Saclay (Essonne), rapport BRGM SGR/IDF R 40840, 77 p., 30 figures, 10 tableaux; 3 annexes

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le groupe de travail n° 3 de la CLI de Saclay a pour mission de présenter une approche globale de l'hydrogéologie du plateau de Saclay et de fournir une information adaptée, étayée et indépendante sur l'impact des activités du CEA. Ce groupe de travail a fait appel au BRGM Service Géologique Régional d'Île-de-France pour lui fournir un appui technique sur la base d'une analyse des données existantes et des modèles de transport des radioéléments réalisés par le BURGEAP et le CEA. Cette étude a été réalisée à partir des données de forages, des études réalisées par ou pour le CEA et des données issues de son réseau de surveillance (piézomètres, suivi du tritium).

L'étude géologique, qui avait pour but de préciser la géométrie des formations, a été réalisée à partir des données de 123 forages. Elle a montré que les Sables de Fontainebleau présents sur le plateau de Saclay sont isolés au sud par la vallée de l'Yvette et en relation au nord avec les alluvions de la Bièvre. Ces sables sont recouverts par une formation peu perméable (Argile à meulière) présentant une apparente continuité et reposent sur un substratum également peu perméable, de plus de 30 m d'épaisseur moyenne.

Sur le plan hydrogéologique, le plateau de Saclay est un système aquifère constitué de deux nappes superposées dont la plus importante est la nappe des Sables de Fontainebleau. Les Sables de Fontainebleau s'avèrent assez homogènes sur le plan hydrodynamique avec des perméabilités comprises entre  $7 \cdot 10^{-6}$  et  $6 \cdot 10^{-5}$  m/s. La nappe, qui montre de faibles fluctuations au cours du temps, réagit tardivement aux épisodes pluvieux du fait de l'Argile à Meulière qui freine l'infiltration d'eau. La géométrie de cette couche et le rôle qu'elle joue dans l'alimentation de la nappe restent assez mal connus.

La carte piézométrique de la nappe des Sables de Fontainebleau, réalisée à partir de plus d'une centaine de points de mesure, montre que l'écoulement principal de la nappe est NO-SE sur le plateau mais qu'il est rapidement influencé par les vallées. Au nord, la nappe est drainée par la Bièvre tandis qu'au sud la nappe n'est pas en liaison avec l'Yvette et se déverse au contact des marnes par une série de sources situées dans les vallées.

Le réseau de surveillance du CEA apparaît adapté à l'écoulement actuel de la nappe et couvre bien la zone de migration potentielle des radionucléides en provenance du site du CEA Saclay. Il faudrait néanmoins prévoir un point de suivi complémentaire au nord, dans le secteur du val d'Albian. Sur les cinq dernières années, l'activité en tritium se situe entre 50 et 200 Bq/l au droit du site et à moins de 20 Bq/l au sud, dans la zone d'exutoire de la nappe. Elle est de 50 à 150 Bq/l dans les étangs et de 100 à 150 Bq/l au droit du CEPr. Ces valeurs sont à rapprocher de la norme OMS pour l'eau de boisson qui est de 7 800 Bq/l et de l'objectif retenu par la directive européenne du 3 novembre 1998 qui est de 100 Bq/l.

Les deux modèles de simulation du transport du tritium mis au point par le BURGEAP et la CEA donnent des résultats différents aussi bien pour les concentrations à stabilisation que pour le temps au bout duquel les concentrations se stabilisent. Ces divergences s'expliquent par des hypothèses de calcul et des valeurs de paramètres différentes qui sont dans l'ensemble plausibles même si certains choix peuvent être discutés. Néanmoins les deux modèles ne conduisent pas à une contamination significative de la nappe des sables de Fontainebleau (3.8 Bq/l au bout de 50 ans dans l'étude du BURGEAP et 0.1 Bq/l au bout de 100 ans dans l'étude du CEA – valeurs calculées pour le tritium à la source de Villiers). De tels modèles pourraient être affinés en réduisant les incertitudes par intégration de nouvelles données et en conduisant une analyse de sensibilité autour des valeurs choisies pour les paramètres.

## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Synthèse</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>Sommaire</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>Introduction</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>1. Données disponibles</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>2. Caractéristiques géologiques</b> .....                                    | <b>9</b>  |
| <b>2.1. Objectif de l'étude</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2.2. Documents et données utilisés</b> .....                                 | <b>9</b>  |
| 2.2.1. Cartes géologiques à 1/50 000 .....                                      | 9         |
| 2.2.2. Banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM .....                        | 9         |
| 2.2.3. Données de campagnes sismiques .....                                     | 9         |
| 2.2.4. Répartition des forages sélectionnés .....                               | 10        |
| 2.2.5. Modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN .....                         | 10        |
| <b>2.3. Utilisation du logiciel GDM</b> .....                                   | <b>10</b> |
| <b>2.4. Aperçu géomorphologique</b> .....                                       | <b>10</b> |
| <b>2.5. Cadre géologique</b> .....  | <b>14</b> |
| 2.5.1. Succession lithostratigraphique .....                                    | 14        |
| 2.5.1.1 <i>Limons des plateaux</i> .....  | 15        |
| 2.5.1.2 <i>Sables de Lozère</i> .....   | 15        |
| 2.5.1.3 <i>Argiles à meulière de Montmorency</i> .....                          | 15        |
| 2.5.1.4 <i>Meulière de Montmorency</i> .....                                    | 16        |
| 2.5.1.5 <i>Sables et grès de Fontainebleau</i> .....                            | 16        |
| 2.5.1.6 <i>Marnes à Huîtres (s.l.)</i> .....                                    | 17        |
| 2.5.1.7 <i>Formation de Brie (s.l.)</i> .....                                   | 17        |
| 2.5.1.8 <i>Argile verte (s.l.)</i> .....  | 18        |
| 2.5.1.9 <i>Marnes supragypseuses</i> .....                                      | 18        |
| 2.5.2. Géométrie des formations sédimentaires .....                             | 18        |
| 2.5.2.1 <i>Cartes en isohypses et en isopaques</i> .....                        | 19        |
| 2.5.2.2 <i>Coupes géologiques</i> .....   | 21        |
| <b>2.6. Conclusions</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>3. Caractéristiques hydrogéologiques</b> .....                               | <b>38</b> |
| <b>3.1. Contexte hydrogéologique</b> .....                                      | <b>38</b> |
| <b>3.2. Paramètres hydrodynamiques</b> .....                                    | <b>39</b> |
| 3.2.1. Nappe superficielle .....  | 39        |
| 3.2.2. Nappe des Sables de Fontainebleau.....                                   | 40        |
| <b>3.3. Exploitation de la nappe</b> .....                                      | <b>44</b> |
| <b>3.4. Variations piézométriques</b> .....                                     | <b>44</b> |
| <b>3.5. Surface piézométrique de la nappe des Sables de Fontainebleau</b> ..... | <b>47</b> |
| 3.5.1. Elaboration de la carte piézométrique.....                               | 47        |
| 3.5.2. Interprétation de la carte piézométrique.....                            | 48        |

|             |  |                  |
|-------------|--|------------------|
| 3.5.3.      | Profil piézométrique .....   | 51               |
| 3.5.4.      | Vitesse d'écoulement de la nappe.....  | 52               |
| <b>3.6.</b> | <b>Alimentation de la nappe des sables de Fontainebleau .....</b>                            | <b>52</b>        |
| <b>4.</b>   | <b><i>Migration de radionucléides dans la nappe des sables de Fontainebleau .....</i></b>    | <b>54</b>        |
| <b>4.1.</b> | <b>Travaux réalisés .....</b>  | <b>54</b>        |
| 4.1.1.      | Mesures de radioactivité dans la nappe des Sables de Fontainebleau.....                      | 54               |
| 4.1.2.      | Modélisations du transport de radionucléides.....  | 56               |
| 4.1.2.1     | <i>Objectifs d'une modélisation de transport d'éléments chimiques dans un aquifère .....</i> | <i>56</i>        |
| 4.1.2.2     | <i>Etudes réalisées.....</i>   | <i>56</i>        |
| <b>4.2.</b> | <b>RAPPELS SUR LA PROPAGATION D'ÉLÉMENTS DANS UNE NAPPE .....</b>                            | <b>57</b>        |
| 4.2.1.      | Principaux mécanismes.....   | 57               |
| 4.2.2.      | Convection et temps de parcours .....  | 57               |
| 4.2.3.      | Dispersion.....  | 60               |
| 4.2.4.      | Adsorption .....   | 60               |
| 4.2.4.1     | <i>Définition .....</i>  | <i>60</i>        |
| 4.2.4.2     | <i>Caractéristiques des valeurs des coefficients Kd.....</i>                                 | <i>61</i>        |
| 4.2.4.3     | <i>Facteurs influençant les valeurs de Kd.....</i>   | <i>61</i>        |
| 4.2.4.4     | <i>Kd du tritium, du plutonium et des isotopes radioactifs du césium.....</i>                | <i>61</i>        |
| 4.2.4.5     | <i>Valeurs de Kd utilisées dans les modélisations.....</i>                                   | <i>62</i>        |
| <b>4.3.</b> | <b>ANALYSE CRITIQUE DES MODÉLISATIONS .....</b>  | <b>62</b>        |
| 4.3.1.      | Modélisation hydrodynamique .....  | 62               |
| 4.3.2.      | Modélisation du transport de radionucléides .....  | 64               |
| 4.3.2.1     | <i>Scénarios simulés.....</i>  | <i>64</i>        |
| 4.3.2.2     | <i>Paramètres du transport dans le cas du tritium.....</i>                                   | <i>65</i>        |
| 4.3.2.3     | <i>Résultats dans le cas du tritium .....</i>  | <i>66</i>        |
| 4.3.2.4     | <i>Comparaison des résultats dans le cas du tritium .....</i>                                | <i>67</i>        |
| 4.3.2.5     | <i>Migration du Plutonium et du Césium.....</i>  | <i>67</i>        |
| 4.3.2.6     | <i>Résumé des choix et hypothèses.....</i>   | <i>68</i>        |
| <b>4.4.</b> | <b>CONCLUSIONS.....</b>  | <b>69</b>        |
|             | <b><i>Conclusion.....</i></b>  | <b><i>71</i></b> |
|             | <b><i>Glossaire.....</i></b>   | <b><i>73</i></b> |
|             | <b><i>Bibliographie.....</i></b>   | <b><i>75</i></b> |
|             | <b><i>Liste des figures .....</i></b>  | <b><i>76</i></b> |
|             | <b><i>Liste des tableaux.....</i></b>  | <b><i>77</i></b> |
|             | <b><i>Liste des annexes .....</i></b>  | <b><i>77</i></b> |
|             | <b><i>Annexes .....</i></b>  | <b><i>78</i></b> |

## **Introduction**

La radioactivité artificielle mesurée dans la nappe des Sables de Fontainebleau sur le plateau de Saclay provient principalement du tritium rejeté par le CEA Saclay. Une Commission Locale d'Information (CLI) a été créée autour du site de Saclay le 29 décembre 1998 par le Président du conseil général de l'Essonne. Cette CLI compte 52 membres à parité élus et non-élus divisés en six groupes de travail :

1. étude du site du Boucher (ancienne usine de traitement de l'uranium du CEA)
2. étude des impacts des nouveaux textes réglementaires sur l'eau
3. hydrogéologie du plateau de Saclay
4. activités de base du CEA Saclay
5. étude sur le traitement et le suivi des déchets/rejets et leur impact
6. cellule d'information et de communication sur les travaux de la CLI

Le groupe de travail n° 3 de la CLI de Saclay a pour mission de présenter une approche globale de l'hydrogéologie du plateau de Saclay et de fournir une information adaptée, étayée et indépendante sur l'impact des activités du CEA.

Ce groupe de travail a fait appel au BRGM Service Géologique Régional d'Ile-de-France pour lui fournir un appui technique sur la base du programme suivant :

- analyse des données existantes
- définition de la géométrie et limites du système
- étude hydrogéologique
- qualité des eaux
- analyse des modèles de transport des radioéléments réalisés par le BURGEAP et le CEA

Cette étude a été réalisée sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général de l'Essonne et financée à 50 % par le Conseil Général et à 50 % par le Secrétariat d'Etat à l'Industrie représenté par la DRIRE d'Ile-de-France. Le présent rapport réunit l'ensemble des résultats de l'étude. Une version synthétique sera par ailleurs réalisée et remise aux membres de la CLI.

## 1. Données disponibles

Les données relatives à l'hydrogéologie du plateau de Saclay sont relativement nombreuses. De nombreuses études ont été réalisées pour le compte du CEA dont une étude détaillée réalisée par BURGEAP en 1994/95 intégrant une modélisation des écoulements et du transport dans les nappes [1]. Une modélisation des écoulements et du transport a également été réalisée par le laboratoire de géophysique du CEA [2]. Ces modèles ont permis de simuler le transport d'éléments radioactifs (tritium en particulier) dans les nappes.

Sur le plan géologique, on dispose dans la Banque des données du Sous-Sol du BRGM de 110 forages dont près de la moitié sont des forages d'eau. Parmi ces forages on en dénombre 39 avec une coupe géologique validée et 33 avec une mesure de niveau d'eau. Enfin nous avons exploité les carottages VT réalisés pour le calage des profils sismiques lors des campagnes d'exploration pétrolière. Parmi ces carottages VT, 82 ont une coupe géologique validée et 74 nous ont fourni un niveau piézométrique déduit des diagraphies de résistivité.

Enfin le CEA a mis à notre disposition les données issues de son réseau de surveillance de la nappe des Sables de Fontainebleau. Ce réseau comporte à la fois des piézomètres permettant de suivre l'évolution du niveau de la nappe et des points de prélèvements mensuels pour le suivi de la radioactivité (Figure 1).

Le réseau piézométrique comprend 5 piézomètres (F41, F42, F43, F44, et F45) situés à l'intérieur du CEA Saclay et suivis depuis 1982.

Le réseau de suivi du Tritium (prélèvements mensuels) comprend :

- à l'intérieur du CEA, 5 points (F41, F42, F43, F44, F45) suivis depuis 1980 et 2 points (F46 et F47) suivis depuis juillet 1997
- à l'extérieur du CEA, 4 points situés au sud, suivis depuis 1991 (F15, F19, F22, F26), 1 point situé au nord, suivi depuis 1979 (F1) et 3 points situés à l'est et à l'ouest (F2, F24, F27), suivis depuis 1995.

Sur les 2 points F46 et F47, des mesures de Potassium 40 et de rayonnement  $\alpha$  et  $\beta$  sont réalisées depuis juillet 1997.

Enfin un suivi du Tritium est effectué au niveau des étangs de Saclay grâce à 2 points suivis depuis 1979 (EV, EN).



## 2. Caractéristiques géologiques

### 2.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'étude géologique du Plateau de Saclay a pour but de préciser la géométrie des formations cénozoïques qui affleurent sur la zone d'étude (des formations superficielles plio-quaternaires au Marnes supragypseuses de l'Eocène supérieur) et de mieux appréhender les relations spatiales qui existent entre ces différentes formations.

### 2.2. DOCUMENTS ET DONNEES UTILISES

#### 2.2.1. Cartes géologiques à 1/50 000

La zone d'étude concerne le quart NE de la feuille Rambouillet (n° 218) et le quart NW de la feuille Corbeil (n° 219). Les cartes géologiques et notices de la première édition (1975) de la feuille Rambouillet et de la troisième édition (1987) de la feuille Corbeil ont été examinées. Elles fournissent des informations sur les limites d'affleurement des différentes formations représentées et sur leurs principales caractéristiques lithologiques.

Cependant, la présence fréquente, sur les versants de plateaux, de colluvions ou d'éboulis ont souvent empêché l'observation des contacts entre les formations du substrat au moment des levés géologiques. C'est la raison pour laquelle nous avons effectué une reconstitution géométrique de la série lithostratigraphique comprise entre les formations quaternaires et les Marnes supragypseuses à l'aide de données de forages provenant de la Banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM et de campagnes sismiques.

#### 2.2.2. Banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM

L'examen critique des dossiers de forages, archivés au Service géologique régional Ile-de-France du BRGM, a permis de retenir, à l'intérieur du périmètre de la zone d'étude, **39 coupes de forages** apparaissant fiables du point de vue de leur positionnement et du calage lithostratigraphique.

#### 2.2.3. Données de campagnes sismiques

Plusieurs campagnes de sismique réflexion ayant eu lieu dans cette région entre 1982 et 1996, il a été possible de récupérer auprès de la Compagnie générale de géophysique (CGG) une base de données de forages (carottages VT) concernant la zone d'étude. De cette base, **84 forages** ont été retenus et utilisés après que l'on ait validé d'une part, l'altitude au sol en le comparant avec le MNT de l'IGN (voir § 2.2.5), d'autre part, les

logs de forages (profondeurs du « mur » des formations) avec les informations géologiques issues des cartes géologiques et des forages BSS avoisinants.

#### **2.2.4. Répartition des forages sélectionnés**

Au total (données BSS + données CGG), **123 forages** ont été utilisés pour l'étude géologique. Ils se répartissent de façon assez homogène sur les 221 km<sup>2</sup> que représente la zone d'étude (17 km en E-W et 13 km en N-S). En moyenne, on dispose donc d'un sondage par 1,8 km<sup>2</sup>.

#### **2.2.5. Modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN**

L'acquisition d'une base « altimétrique » numérique auprès de l'Institut géographique national (IGN), appelée Modèle Numérique de Terrain (MNT), couvrant la zone d'étude avec une maille de 50 x 50 mètres, a permis :

- de préciser la géomorphologie du plateau de Saclay dans son contexte régional ;
- de croiser la surface topographique avec les surfaces structurales des « murs » des différentes formations géologiques retenues, afin de cartographier automatiquement leurs limites d'extension (voir § 2.3.).

### **2.3. UTILISATION DU LOGICIEL GDM**

Les données géologiques de forages (codes des formations et profondeurs des « toits » et « murs ») ont été saisies sur tableur EXCEL, puis exportées sur GDM (logiciel de traitement de bases de données, conçu et commercialisé par le BRGM). Des traitements spécifiques par interpolations des différents types de valeurs contenus dans la base ont permis d'établir :

- des cartes d'isoprofondeurs absolues (isohypses) des « murs » des différentes formations étudiées ;
- des cartes d'isoépaisseurs (isopaques) de ces mêmes formations.

La base MNT a également été traitée sur GDM, ce qui a abouti à une carte topographique en courbes de niveaux. L'intersection de cette surface topographique avec les surfaces des « murs » des formations géologiques a permis de cartographier, de manière automatique, les limites d'extension et d'affleurement de chacune des formations et d'élaborer automatiquement des coupes géologiques selon des profils E-W et N-S choisis.

### **2.4. APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE**

Le plateau de Saclay s'inscrit dans une vaste région de plateaux (NW du Hurepoix) dont le bord oriental surplombe la vallée de la Seine. Incliné WNW-ESE, il culmine à des

altitudes moyennes comprises entre 165 et 150 m. Ses limites naturelles sont matérialisées par des vallées creusées par trois rivières (Figure 2 et Figure 3) :

- la Bièvre, au Nord, qui s'écoule du NW au SE selon une pente comprise entre 115 et 55 m d'altitude ;
- l'Yvette, au Sud, plus large et plus profondément encaissée, qui coule d'Ouest en Est entre 75 et 50 m d'altitude ;
- la Mérantaise, affluent en rive gauche de l'Yvette, de direction parallèle à celle de la Bièvre, qui entaille le plateau sur 8 km de longueur, entre 130 et 65 m d'altitude environ.

Ces entailles fluviales induisent des dénivelés compris, approximativement, entre 50 m et 100 m d'amont en aval des cours d'eau : les plus fortes amplitudes de ces dénivelés caractérisent le cours de la Bièvre et celui de la Mérantaise ; les plus faibles, le cours de l'Yvette.

Dans la zone volontairement définie pour cette étude et délimitée naturellement par le réseau hydrographique décrit ci-dessus, le plateau de Saclay s'étale sur 15 km de longueur WNW-ESE, et sur 4 à 6,5 km de largeur. Sa terminaison orientale présente une digitation à trois branches dont l'appendice central, large de 2 km environ, dépasse les deux autres d'environ 3 km vers l'ESE.

Deux vallonnements, de faible amplitude et à large rayon de courbure, prolongent les creux (thalwegs) de cette digitation. Ils abaissent l'altitude suivant une direction parallèle au grand axe du plateau :

- au Nord, le vallonnement dans lequel sont situés les étangs de Saclay, en relation avec la vallée du ru de Vauhallaan ;
- au Sud, un vallonnement moins marqué et de moindre extension longitudinale, s'étendant entre le thalweg de Villiers-le-Bâcle, à l'Ouest, et celui du Guichet, à l'Est. Le CEN du CEA est en grande partie situé dans ce vallonnement.

La vue en trois dimensions (3D) restituée par GDM à partir du MNT (Figure 3) est intéressante, car outre les caractéristiques géomorphologiques décrites ci-dessus, elle met également en évidence un phénomène de basculement d'Ouest en Est affectant le plateau de Saclay par rapport au plateau septentrional, situé au Nord de la Bièvre, et au plateau méridional, situé au Sud de l'Yvette, lesquels présentent une altitude moyenne plus élevée (surtout pour le plateau septentrional) et une quasi horizontalité. Ces traits morphologiques pourraient traduire l'existence d'une discontinuité structurale (faille) au droit de la vallée de la Bièvre (et peut-être aussi au droit de la vallée de l'Yvette). Nous verrons plus loin que les cartes en isohypses du « mur » des formations tertiaires tendent à conforter cette hypothèse.

Un autre trait morphologique caractérise les versants de ce plateau : en effet, les versants S et SW se révèlent plus abrupts que les versants N et NE. Ceci résulte du profil dissymétrique des vallées acquis au cours de leur enfouissement plio-quadernaire. De cette observation, il est permis de penser que la part d'infiltration des eaux météoriques par rapport à celle du ruissellement est plus importante sur les versants N et NE que sur les versants S et SW.

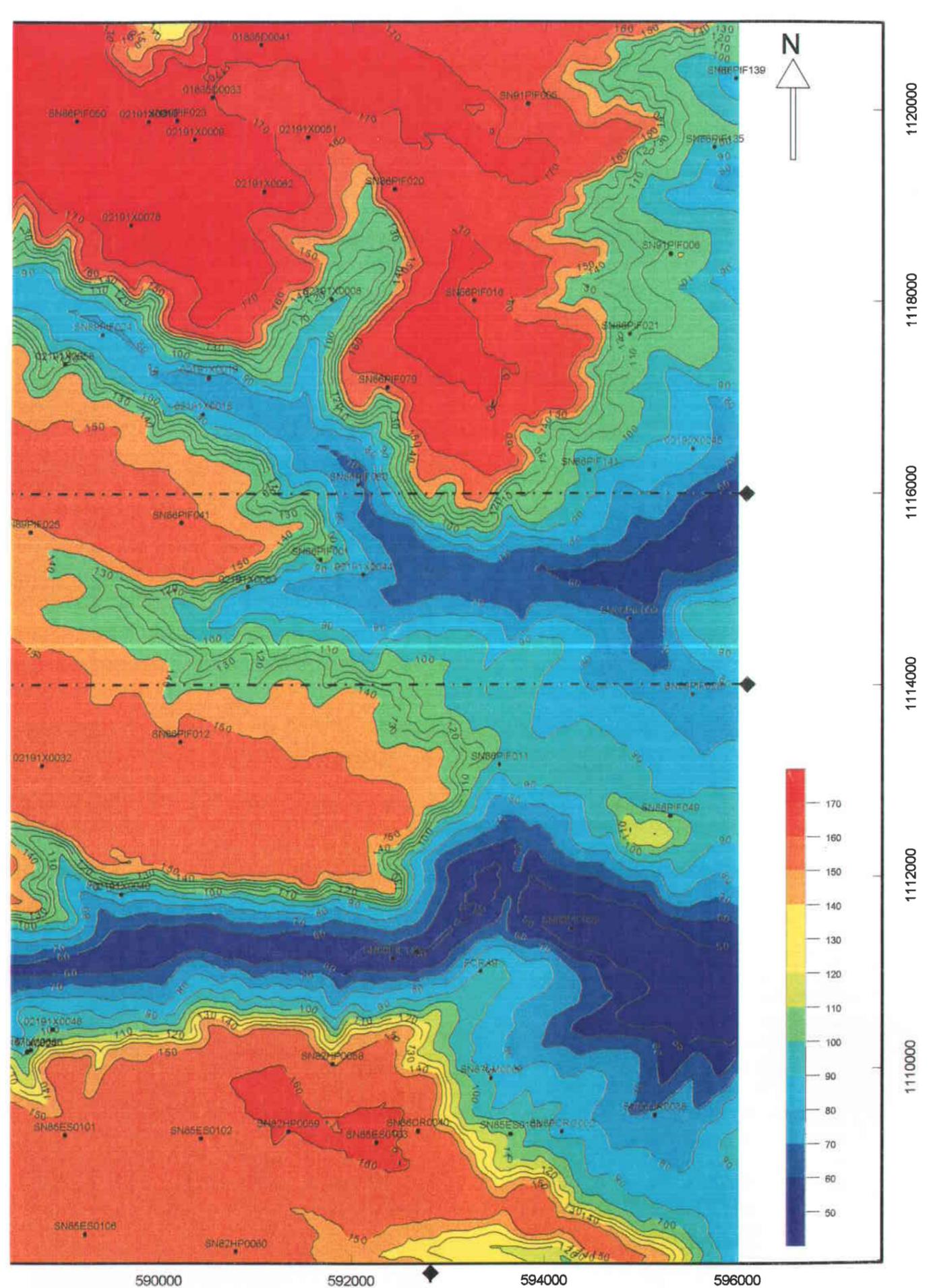
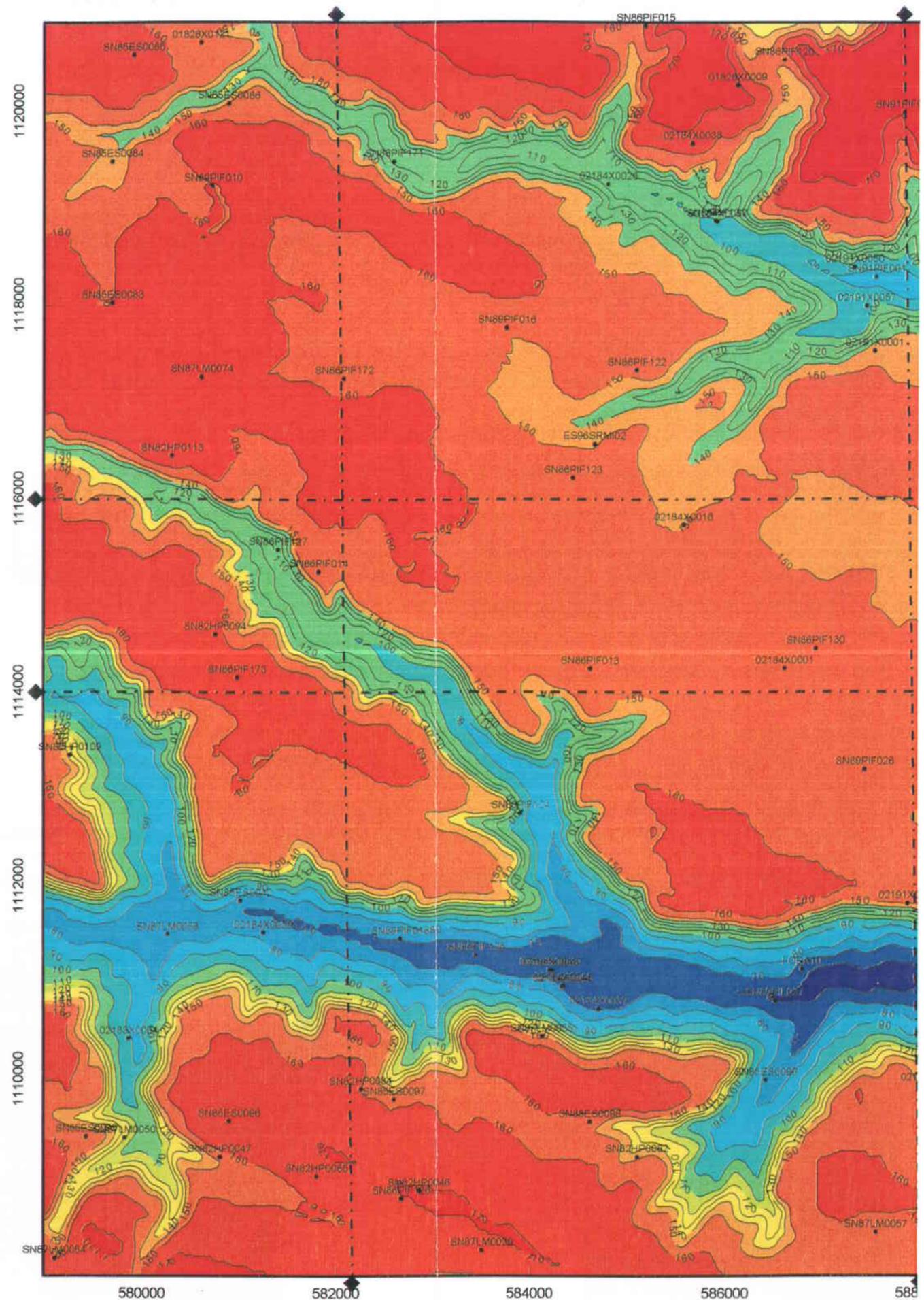


Fig. 2 : Carte topographique issue du MNT (1/50 000)

Trace des coupes (Ouest-Est : fig. 17, Sud-Nord : fig. 18)

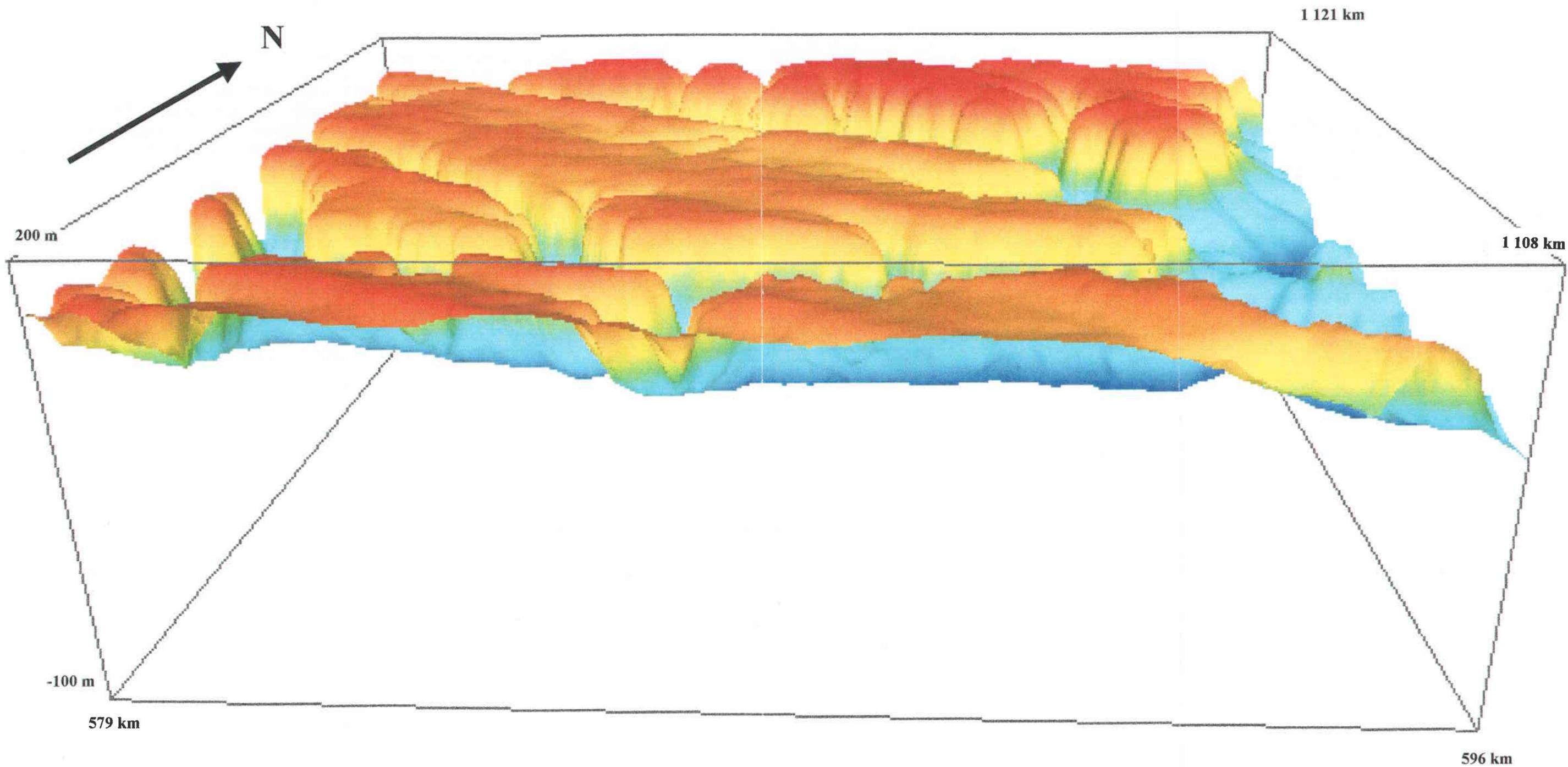


Fig. 3 : Représentation 3D de la topographie du plateau de Saclay (dilatation des altitudes par un facteur 20)

## 2.5. CADRE GEOLOGIQUE

### 2.5.1. Succession lithostratigraphique

La succession lithostratigraphique, au droit du plateau de Saclay, nous est fournie par la description des terrains qui en est faite dans les notices des feuilles Rambouillet (218) et Corbeil (219) à 1/50 000, et par les relevés interprétés de coupes de forages provenant de la BSS. De manière résumée et partielle car limitée vers le bas, elle s'établit, de haut en bas, de la façon suivante :

1. **Limons des plateaux** (Quaternaire)
2. **Sables de Lozère** ( ? : Miocène inf. [Burdigalien] ou Pliocène, plus probablement)
3. **Argiles à meulière de Montmorency** ( ? : Miocène à Pliocène)
4. **Meulière de Montmorency** (Chattien : Oligocène sup.)
5. **Sables et grès de Fontainebleau** (Rupélien = faciès stampien : Oligocène inf.)
6. **Marnes à Huîtres s.l.** (Rupélien = faciès stampien : Oligocène inf.)
7. **Formation de Brie s.l.** (Rupélien = faciès sannoisien : Oligocène inf.)
8. **Argile verte s.l.** (Rupélien = faciès sannoisien : Oligocène inf.)
9. **Marnes supragypseuses** (Priabonien sup. = Ludien sup. : Eocène sup.)

Nous avons regroupé les formations 1 à 3 sous l'appellation « formations superficielles », sachant que les Argiles à meulière représentent le résidu de l'altération du Calcaire de Beauce. Ce sont, en effet, des argiles de décalcification provenant de la dissolution de la fraction carbonatée de la roche ; d'un point de vue génétique, elles sont à comparer aux Argiles à meulière issues du Calcaire de Brie, ou bien encore aux Argiles à silex issues de la craie ; elles sont donc à classer dans la catégorie des altérites. Les Argiles à meulière étant sous-jacentes aux Sables de Lozère – attribués, sans arguments de datation, soit au Miocène inférieur (notice de la feuille Rambouillet, 1975), soit au Pliocène (notice de la feuille Corbeil, 1987) – ont pu se former au cours de la longue période d'émersion (~16 Ma) qui a affecté le bassin de Paris durant le Miocène et le Pliocène.

Selon F. Menillet, cette altération intense serait plutôt postérieure au dépôt des Sables de Lozère (attribués au Pliocène supérieur : Prétiglien) ; elle correspondrait aux périodes tempérées chaudes qui caractérisent le Tiglien (limite Pliocène – Pléistocène) et le Waalien (Pléistocène inférieur).

La plupart des sondages réalisés dans la zone d'étude, ainsi que tous les sondages CGG, ne fournissent aucun renseignement sur la nature et les épaisseurs de ces formations superficielles. En ce qui concerne les forages CGG, seule l'épaisseur cumulée des formations sus-jacentes aux Sables de Fontainebleau est indiquée. Aussi, il n'a pas été possible de cartographier, sur la base des données de forages, les variations d'épaisseurs de ces formations superficielles. Nous n'avons pu, en toute objectivité, élaborer que la carte des épaisseurs du recouvrement des Sables de Fontainebleau, qui intègre l'épaisseur de la Meulière de Montmorency.

Les Sables et grès de Fontainebleau (5) abrite la nappe la plus importante située sous le plateau. Les formations 6 à 9 constituent le « mur » imperméable de cette nappe. C'est la raison pour laquelle nous ne nous sommes pas intéressés, pour cette étude, aux terrains sous-jacents.

#### 2.5.1.1 Limons des plateaux

- **Age** : Quaternaire ancien à récent.
- **Lithologie** : Dépôts fins, meubles, argileux (plus de 20 % d'argiles) et sableux. A la base, ils peuvent être carbonatés lorsqu'ils reposent sur un substratum calcaire. Teinte ocre à brun rougeâtre. Peuvent renfermer de nombreux débris de meulière mélangés à des résidus des Sables de Lozère.
- **Origine** : Dépôts d'origine éolienne de nature périglaciaire (lœss). Ils coiffent le sommet des plateaux.
- **Epaisseur** : 0,5 à 3 m. Peut atteindre très localement 9 m. Ces grandes variations d'épaisseur s'expliquent par le fait que ces dépôts éoliens sont venus comblés la paléotopographie très irrégulière du « toit » des Argiles à meulière.

#### 2.5.1.2 Sables de Lozère

- **Age** : Miocène inférieur (Burdigalien) ou Pliocène, plus probablement. Datation rendue difficile du fait de l'absence de fossiles.
- **Lithologie** : Observés et décrits pour la première fois à Lozère, commune située sur le flanc sud du plateau de Saclay. Ce sont des sables argileux (kaolinite), à quartz et feldspaths, grossiers et mal classés, pouvant contenir des graviers de quartz (« dragées »).
- **Origine** : Dépôts d'origine fluviatile provenant probablement du Massif central et transporté par la pré-Loire – pré-Seine au cours du Pliocène (?). On ne les observe que sur la rive gauche de la Seine.
- **Epaisseur** : 2 à 5 m. Comme les Limons de plateaux, ils reposent sur une paléosurface irrégulière (« toit » des Argiles à meulière), ce qui explique leur irrégularité.

#### 2.5.1.3 Argiles à meulière de Montmorency

- **Age** : Miocène à Pliocène (?)
- **Lithologie** : Argile plastique, grise ou rougeâtre, ferrugineuse à kaolinite prédominante et à montmorillonite, renfermant des blocs de meulière compacte ou caverneuse. Très souvent contaminée par les Sables de Lozère sus-jacents.

- **Origine** : Résidus de l'altération du Calcaire de Beauce par processus pédogénétique, en climat tropical à saisons alternantes (A. Prost, 1962). Ce sont des argiles de décalcification résultant de la dissolution de la fraction carbonatée de la roche mère.
- **Epaisseur** : 1 à 6 m.

#### 2.5.1.4 Meulière de Montmorency

- **Age** : Chattien : Oligocène supérieur, pour la roche mère (le Calcaire de Beauce) ; Miocène à Pliocène (?), pour le processus pédogénétique à l'origine de la « meulièrement ».
- **Lithologie** : Faciès siliceux du Calcaire de Beauce (d'origine lacustre), compact ou caverneux, de couleur grise à gris-jaune, rouille par altération, avec calcédoine et quartz et un peu d'opale. Disposé soit en bancs de meulière, soit en blocs meuliers plus ou moins continus, parfois irréguliers, plus ou moins emballés dans une argile plastique de décalcification (voir Argiles à meulière).
- **Origine** : Altération et silicification du Calcaire de Beauce par processus pédogénétique (accident siliceux). La silice proviendrait de l'argile de décalcification : cette silice serait libérée lors de la transformation de l'illite (issue de la roche mère) en kaolinite.
- **Epaisseur** : 2 à 11 m (6 m en moyenne).

#### 2.5.1.5 Sables et grès de Fontainebleau

- **Age** : Rupélien = faciès stampien : Oligocène inférieur.
- **Lithologie** : Sable fin, blanc devenant jaunâtre, soit au sommet, lorsqu'il est « contaminé » par les infiltrations des eaux superficielles ayant « percolé » les formations plio-quadernaires, soit à la base, au fond des vallées, dans la zone de battement des nappes alluviales. C'est un sable siliceux très pur (97 à 99 % de quartz), légèrement micacé, fin (médiane : 150 µm) et bien classé. Il renferme des minéraux lourds qui sont, en pourcentage décroissant : tourmaline, staurotide, disthène, andalousite. Très fluants, les sables masquent souvent les niveaux sous-jacents sur le bas des flancs de vallées.  
Des bancs de grès discontinus, s'individualisent vers le sommet de la formation, disposés en alignements WNW-ESE. Ils forment des chaos sur ou au bas des versants lorsqu'ils sont déchaussés par l'érosion fluviale.  
La base de cette formation est généralement matérialisée par un niveau de d'argile sableuse gris-vert à bioclastes plus ou moins dissous.
- **Origine** : Dépôts de dunes littorales « éolisés ».

- **Epaisseur** : 44 à 73 m (60 m en moyenne), dont 2 à 3 m de grès discontinus vers le sommet et 2 à 3 m d'argile sableuse bioclastique à la base.

#### 2.5.1.6 Marnes à Huîtres (s.l.)

- **Age** : Rupélien = faciès stampien : Oligocène inférieur.
- **Lithologie** : Nous avons regroupé sous cette appellation plusieurs faciès qui sont rarement différenciés dans les descriptions de sondages, ou d'affleurements. Cependant, ceux-ci l'ont été, en particulier, dans le sondage carotté (n° BSS : 02184X0001), situé à proximité du CEN du CEA, et décrits par Cl. Cavelier (Figure 4). Trois niveaux y sont distingués, du haut vers le bas :
  - **Falun de Jeurre** : sable argileux et grès calcaire coquillier (2 m) ;
  - **Argiles à Corbules** : argile sableuse bioclastique, renfermant, entre autres, de nombreux foraminifères (4 m) ;
  - **Marnes à Huîtres (s.s.)** : marnes sableuses gris-jaune à verdâtres, très fossilifères, particulièrement riches en coquilles d'*Ostrea cyathula*, dans la partie supérieure (sur 1,90 m), et en coquilles d'*Ostrea longirostris*, dans la partie inférieure (sur 1,60 m) ; un niveau de marne blanche, épais de 1,10 m (dit Marne de Longjumeau, développé également dans la région de Palaiseau) s'intercale entre les deux.
- **Origine** : Dépôts marins littoraux.
- **Epaisseur** : 2 à 14 m (7 m en moyenne). Ces épaisseurs ont presque toujours été relevées en forages, du fait de la rareté des affleurements. Les fortes épaisseurs indiquées dans certains forages sont dues probablement au fait que tous les niveaux argilo-marneux, situés immédiatement sous le faciès sableux des Sables de Fontainebleau, ont été regroupés sous cette appellation (cela concerne en particulier les forages CGG, dont les coupes géologiques résultent de l'interprétation de diagraphies).

#### 2.5.1.7 Formation de Brie (s.l.)

- **Age** : Rupélien = faciès sannoisien : Oligocène inférieur.
- **Lithologie** : Cette formation comporte deux niveaux principaux qui se présentent sous des faciès variés (Figure 4) :
  - à la base, la **Caillasse d'Orgemont** (1,90 m), formée d'alternances de marnes indurées blanches, de calcaires blancs et d'argiles feuilletées vertes et ocre, avec, dans la région de Palaiseau, un niveau de gypse saccharoïde ;
  - au sommet, le **Calcaire de Sannois** (2,10 m), qui est un calcaire bréchique, marneux, blanc à verdâtre, très fossilifère (à grosses milioles, en particulier). Il passe latéralement, à l'Est du plateau de Saclay, au **Calcaire de Brie**, formé de marnes calcaires ou de calcaires marneux blancs, dont l'épaisseur peut atteindre 10 m (il peut être siliceux, car « meuliérisé », en surface).

- **Origine** : Lagunaire (Caillasse d'Orgemont) ; marine (Calcaire de Sannois) ; lacustre (Calcaire de Brie).
- **Epaisseur** : 2 à 9 m (3,5 m en moyenne).

#### 2.5.1.8 Argile verte (s.l.)

- **Age** : Rupélien = faciès sannoisien : Oligocène inférieur.
- **Lithologie** : Cette formation comporte localement deux niveaux :
  - à la base, les **Glaises à cyrènes** (0,5 m à 3,2 m). Ce sont des argiles ou marnes brunâtres à vertes, souvent feuilletées, à filets sableux blancs et à petits lits fossilifères (*Cyrena concexa*, *Nystia plicata*). Elles sont bien développées dans la partie nord de la feuille Corbeil (n° 219), tandis qu'elles s'amincissent vers le Sud de la feuille, jusqu'à disparaître ;
  - au sommet, l'Argile verte s.s., dite **Argile verte de Romainville** (4 à 7,70 m). C'est une argile verte compacte pouvant renfermer des nodules calcaires blanchâtres et de fines passées de gypse microcristallin.
- **Origine** : Dépôts lagunaires.
- **Epaisseur** : 2 à 11 m (6,5 m en moyenne). Ces épaisseurs ont presque toujours été relevées en forages, du fait de la rareté des affleurements.

#### 2.5.1.9 Marnes supragypseuses

- **Age** : Priabonien supérieur = Ludien supérieur : Eocène supérieur.
- **Lithologie** : Cette formation comporte deux niveaux marneux :
  - à la base, les **Marnes bleues d'Argenteuil**, les plus épaisses (9 à 12 m). Ce sont des marnes compactes, gris bleuté, à passées de gypse microcristallin appelées « bancs-de-chien » ;
  - au dessus, les **Marnes blanches de Pantin** (2 à 8 m), plus argileuses à leur sommet, et passant à un calcaire à la base. Elles peuvent être recouvertes, dans la zone d'étude, par un banc de 0,8 m de gypse saccharoïde, appelé « marabet ».
- **Origine** : Lagunaire (Argenteuil) ; lacustre puis lagunaire (Pantin).
- **Epaisseur** : 3 à 18 m (12 m en moyenne). Ces épaisseurs ont presque toujours été relevées en forages, du fait de la rareté des affleurements.

#### 2.5.2. Géométrie des formations sédimentaires

Les données géologiques, fournies par les 123 forages répartis sur la zone d'étude, ont donc été traitées à l'aide du logiciel GDM en vue d'établir des cartes en isohypses et en isopaques relatives aux formations sédimentaires décrites au chapitre précédent. Les surfaces structurales obtenues (isohypses) ont été combinées au MNT afin de générer

automatiquement, à l'aide d'un module spécifique de GDM, des coupes géologiques E-W et N-S.

Cette synthèse cartographique numérique avait pour but de préciser :

- la géométrie des formations sédimentaires ;
- les relations géométriques existant entre la nappe des Sables de Fontainebleau et les formations encaissantes (couverture mio-plio-quadernaire et semelle argilo-marneuse oligo-éocène) ;
- les limites du système.

Sur les 123 forages de la base de données :

- 102 ont touché les Sables de Fontainebleau ;
- 82 ont traversé le « mur » des Sables de Fontainebleau ;
- 59 ont recoupé le « toit » et le « mur » des Sables de Fontainebleau .

#### 2.5.2.1 Cartes en isohypses et en isopaques

**Remarque :** Les zones blanches, sur les cartes illustrant ce chapitre, correspondent aux surfaces où le « mur » de la formation représentée se situe au-dessus de la topographie. Le « mur » est donc absent du fait de l'érosion fluviale. La limite couleurs – blanc correspond donc à la limite d'affleurement du « mur » de la formation. Elle est obtenue de façon automatique avec GDM en croisant la grille des points MNT (topographie) avec celle de chacune des différentes surfaces structurales (« murs »).

##### • *Formations de couverture* (Figure 5 et Figure 6)

Elles regroupent les Limons des plateaux, les Sables de Lozère, les Argiles à meulière et la Meulière de Montmorency. Elles couvrent entièrement le plateau de Saclay, ainsi que les plateaux septentrional et méridional.

Sur le plateau de Saclay, elles présentent des épaisseurs (Figure 5) variant entre 1 m (en bordure de plateau) et 18 m. Les plus fortes épaisseurs (12 à 18 m), se localisent dans la partie NE et sur les branches nord et sud de la terminaison SE du plateau ; les plus faibles (autre sur la bordure), se situent dans les deux vallonnements (voir § 2.4), avec un minima (4 à 6 m) centré sous les étangs de Saclay.

Le « mur » (Figure 6) de cette couverture, sur le plateau de Saclay, s'établit à des altitudes moyennes comprises entre 143 et 147 m. Un forage indique une profondeur anormalement basse dans le coin NW de la carte. Les courbes mettent aussi en évidence, à l'Ouest, une zone haute (en jaune) allongée NNW-SSE (altitudes comprises entre 151 et 157 m) recoupant la vallée de la Mérantaise. Ce dôme pourrait se relier à celui apparaissant dans la partie ouest du plateau méridional.

Sur le plateau septentrional, les altitudes du « mur » sont nettement plus élevées (entre 155 et 166 environ), soit environ 10 m de plus (en moyenne) que sur le plateau de Saclay, alors que la fourchette des épaisseurs reste identique. Cet aspect structural

renforce l'hypothèse (évoquée au § 2.4, sur des considérations géomorphologiques) de la présence d'une faille qui coïnciderait avec le cours de la Bièvre.

• **Formation perméable des Sables et grès de Fontainebleau** (Figure 7 et Figure 8)

Les Sables et grès de Fontainebleau occupent toute la zone des plateaux ; ils affleurent au niveau des versants de façon plus ou moins abrupte selon l'orientation de ces derniers (voir § 2.4).

Leurs épaisseurs, lorsqu'ils ne sont pas érodés, varient de 44 à 73 m sur l'ensemble de la zone (Figure 7). Les plus fortes concernent les 2/3 orientaux du plateau septentrional (65 à 70 m en moyenne) et la majeure partie du plateau méridional (60 à 65 m en moyenne).

Sous le plateau de Saclay, les épaisseurs varient entre 44 et 61 m. La moitié orientale de celui-ci montre des puissances supérieures à 55 m (55 à 61 m), tandis que la moitié occidentale se caractérise par des épaisseurs inférieures à 55 m (44 à 55 m). Les isopaques dessinent, dans ce dernier secteur, un couloir de 2 à 4 km de largeur (en jaune) orienté N-S.

Le « mur » des Sables et grès de Fontainebleau (Figure 8) se trouve à des altitudes comprises entre 63 et 103 m. Les altitudes les plus élevées (> 90 m) sont regroupées au Nord de la zone d'étude, sous le plateau septentrional et sous la partie NW du plateau de Saclay ; elles décroissent plus ou moins progressivement vers le Sud et le SE.

Sous le plateau de Saclay, le « mur » des Sables et grès de Fontainebleau s'établit à des altitudes comprises entre 100 et 84 m environ, l'allure des isohypses matérialisant une pente globalement dirigée vers le Sud et le SE.

La figure 8 fait également apparaître deux zones basses dessinant deux couloirs (en bleu et bleu-vert), l'un orienté NW-SE (entre 63 et 84 m d'altitude), l'autre orienté NNW-SSE (entre 70 et 84 m d'altitude). Ces deux étroites structures synclinales de faible amplitude (14 à 21 m maximum pour 4 à 5 km de large) convergent vers le SE de la carte. Elles bordent une structure anticlinale plus large, également de faible amplitude, (15 m pour 8 km de large) qui concerne la moitié occidentale du plateau de Saclay. C'est dans la partie la plus élevée de cette structure anticlinale que se superposent les plus faibles épaisseurs de Sables et grès de Fontainebleau (Figure 7).

Concernant les limites d'affleurement de cette formation, la figure 8 montre clairement :

- que la vallée de l'Yvette constitue une séparation naturelle sur plus de 12 km entre le plateau de Saclay et le plateau méridional ;
- que la vallée de la Bièvre en forme une autre, dans sa partie aval, entre le plateau de Saclay et le plateau septentrional. Dans la partie amont, la nappe des Sables de Fontainebleau communique directement avec la nappe des alluvions de la Bièvre.

- **Formations argilo-marneuses imperméables** (Figure 9 à Figure 16)

Nous avons regroupé dans cet ensemble les formations à dominante ou exclusivement argileuse et argilo-marneuse situées sous les Sables de Fontainebleau, à savoir : les Marnes à Huîtres *s.l.*, la Formation de Brie *s.l.*, l'Argile verte *s.l.* et les Marnes supragypseuses. Ces quatre formations constituent la semelle étanche de la nappe de Fontainebleau, empêchant toute communication de celle-ci avec les nappes plus profondes.

Les restitutions cartographiques à partir des données de forages avaient pour but de vérifier la continuité de ces formations sous le plateau de Saclay et au-delà. Toutes les cartes des isohypses et isopaques élaborées confirment leur présence, ainsi que leur continuité, validée par les méthodes d'interpolation utilisées.

Au plan structural, toutes les cartes en isohypses mettent en évidence une vaste zone synclinale de faible amplitude, occupant presque toute la surface investiguée, fermée au NW, bordée au N et au SW par les flancs d'anticlinaux et pentée vers le SE. Cette structure induit une direction principale d'écoulement dirigée NW-SE.

#### **2.5.2.2 Coupes géologiques (Figure 17 et Figure 18)**

Des coupes géologiques E-W et N-S ont été dessinées de façon automatique à l'aide d'un module spécifique de GDM. Elles illustrent, toutes, le caractère tabulaire et régulier de la série lithostratigraphique étudiée et la continuité, en terme de dépôts, des différentes formations.

Les deux coupes S-N (Figure 18) sont les plus intéressantes dans la mesure où :

- elles rendent bien compte de la profonde et large entaille faite par la vallée de l'Yvette à travers toute la masse des Sables de Fontainebleau, affectant plus ou moins profondément la semelle argilo-marneuse imperméable.
- elles illustrent le rôle parfaitement séparateur de la vallée de l'Yvette entre le plateau méridional et le plateau de Saclay ;
- elles montrent bien que la vallée de la Bièvre joue le rôle de barrière entre le plateau de Saclay et le plateau septentrional seulement dans sa partie avale (coupe SN 588000), tandis que dans sa partie amont, où elle est insuffisamment profonde, sa nappe alluviale se trouve en relation directe avec la nappe aquifère des Sables de Fontainebleau (coupe SN 582000).

## **2.6. CONCLUSIONS**

Des diverses observations et interprétations faites à partir des données topographiques et des données géologiques disponibles, ainsi que des restitutions cartographiques réalisées, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- Le plateau de Saclay représente une entité géomorphologique partiellement limitée au N et au SE par, respectivement, la vallée de la Bièvre et la vallée de la

Mérantaise ; très bien limitée au sud et à l'est par la vallée de l'Yvette et la vallée de la Seine.

- Les Sables de Fontainebleau, au niveau du plateau, sont recouverts par une formation théoriquement peu perméable (Argile à meulière) présentant une apparente continuité.
- Il existe bien une semelle argileuse à argilo-marneuse continue de plus de 30 m d'épaisseur moyenne (Marnes à Huîtres *s.l.*, Formation de Brie *s.l.*, Argile verte *s.l.* et Marnes supragypseuses) qui isole la nappe des Sables de Fontainebleau des nappes plus profondes.
- Aucune communication latérale n'apparaît, dans l'emprise de la zone d'étude, entre le plateau de Saclay et le plateau méridional.
- Dans la partie amont de la Bièvre, la nappe des Sables de Fontainebleau est en contact direct avec la nappe alluviale.

Etude hydrogéologique du plateau de Saclay

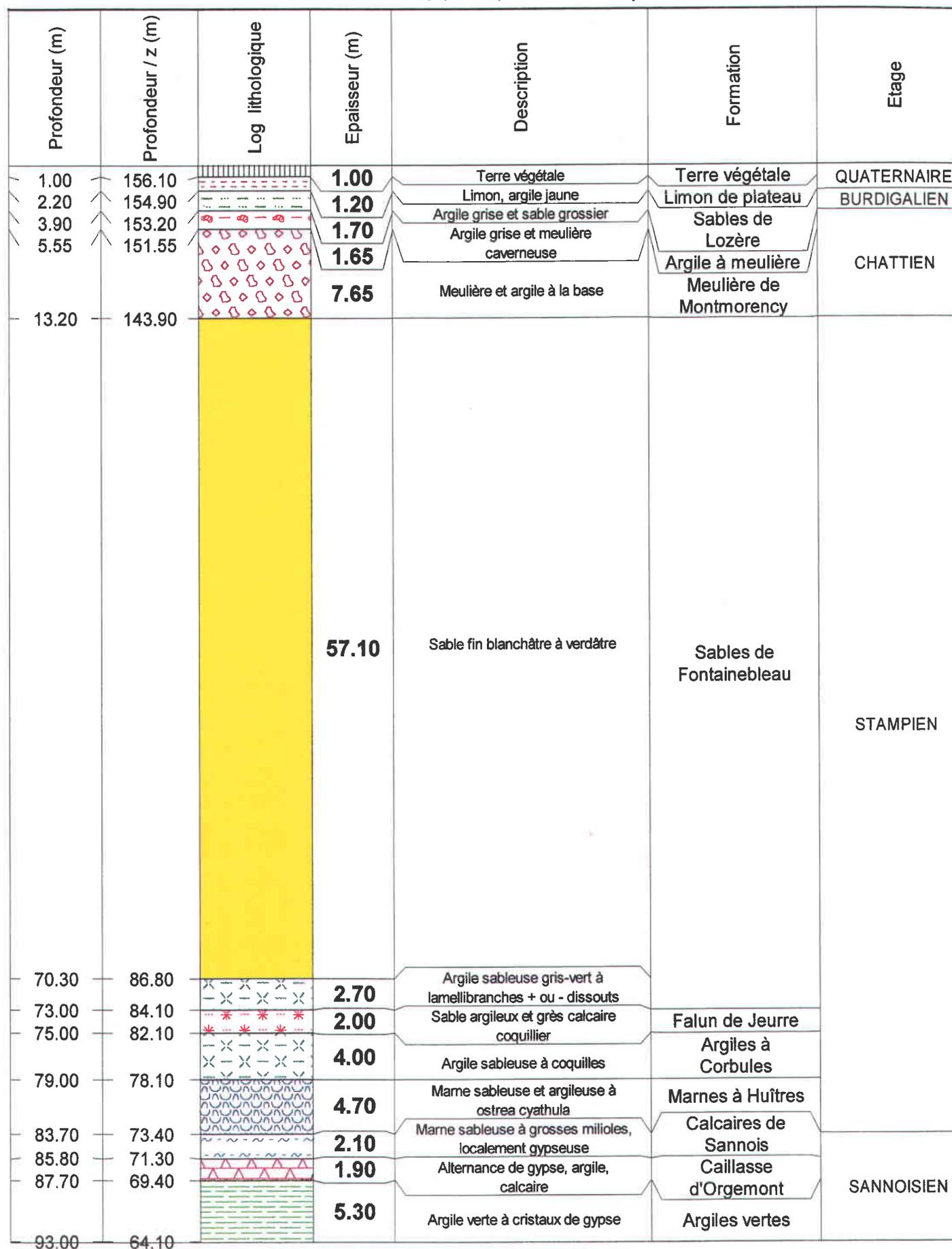


Figure 4. Coupe lithostratigraphique du forage 02184X0001



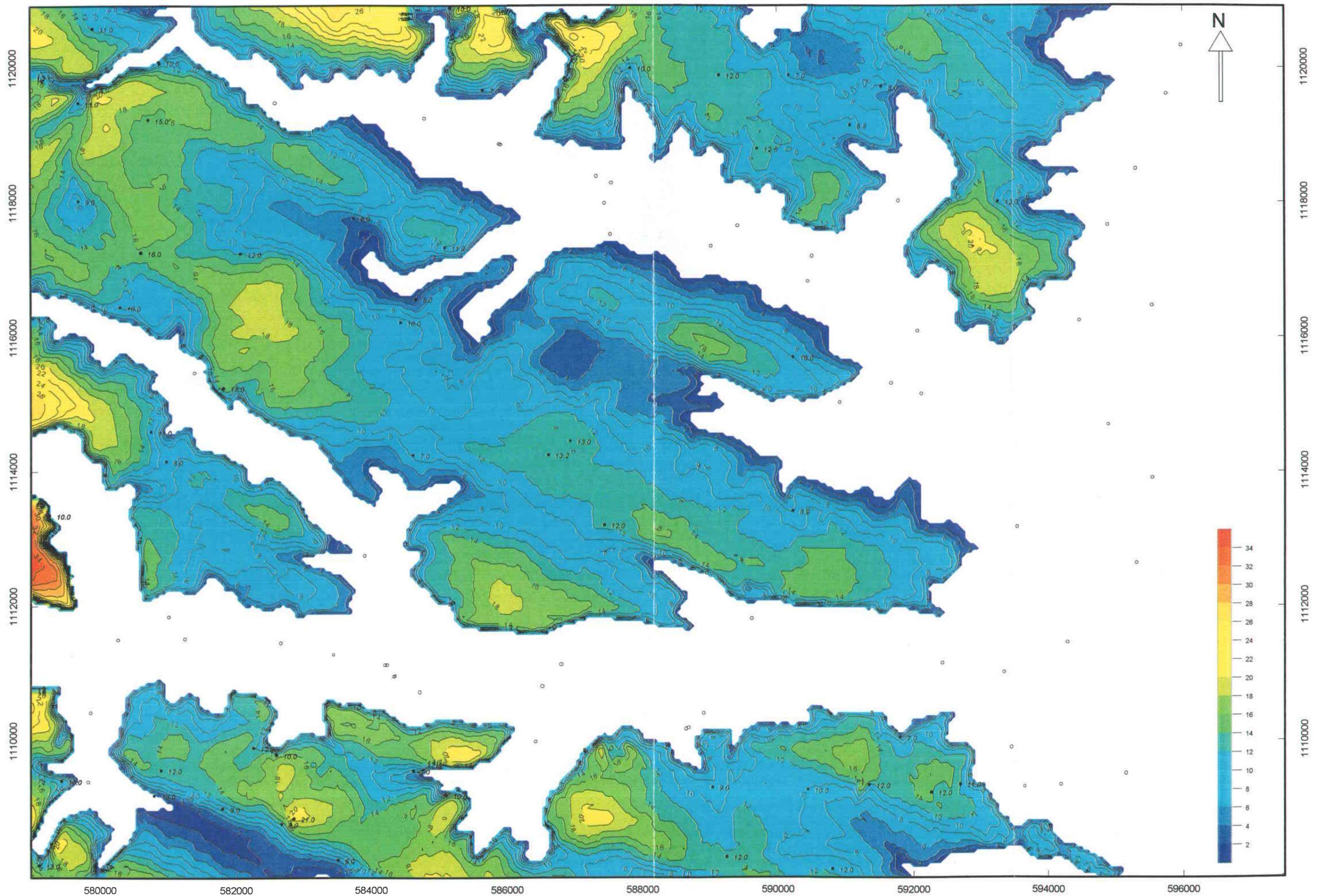


Fig. 5 : Carte des isopaches des formations de couverture (1/50 000)

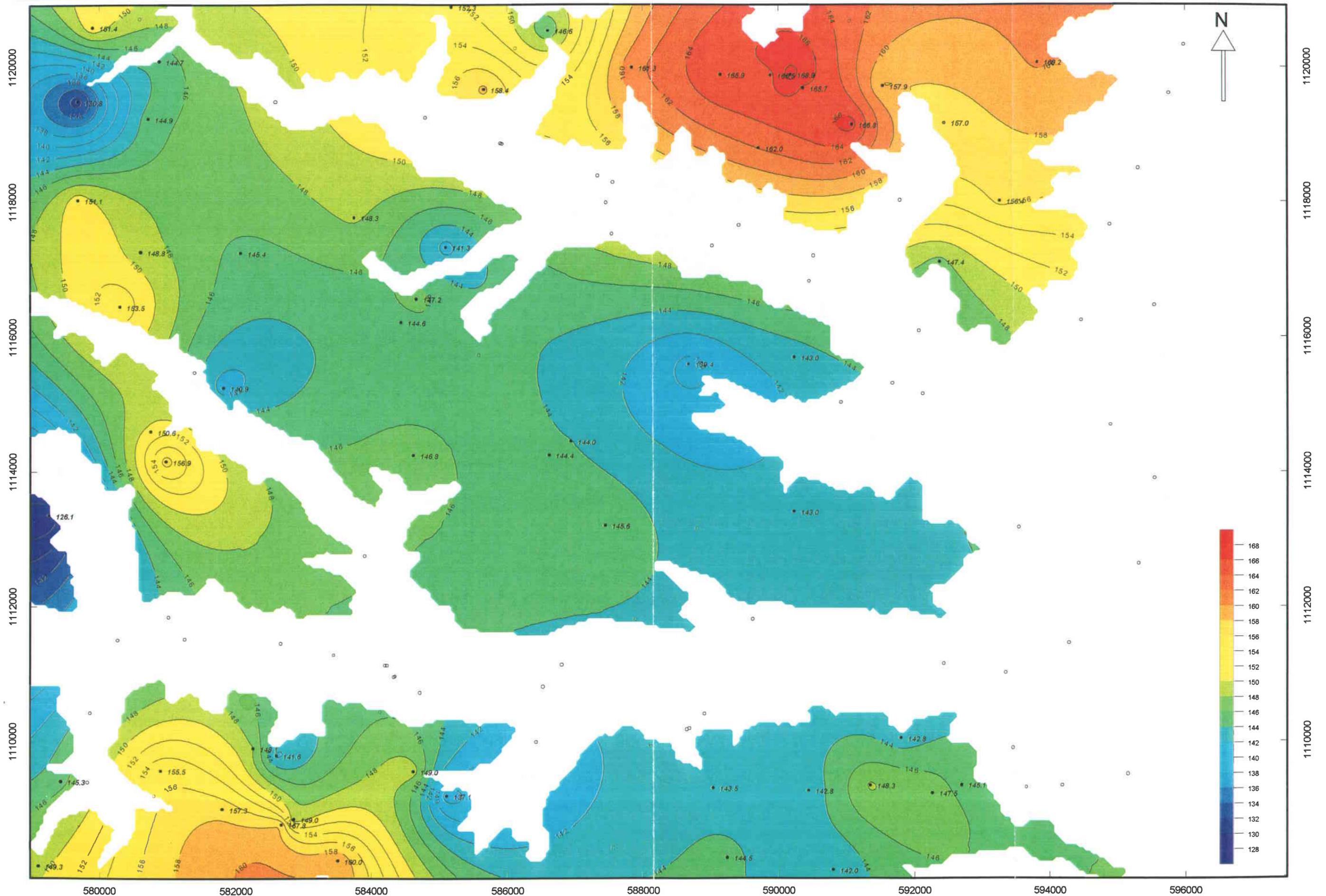


Fig. 6 : Carte des isohypses du « mur » des formations de couverture (1/50 000)

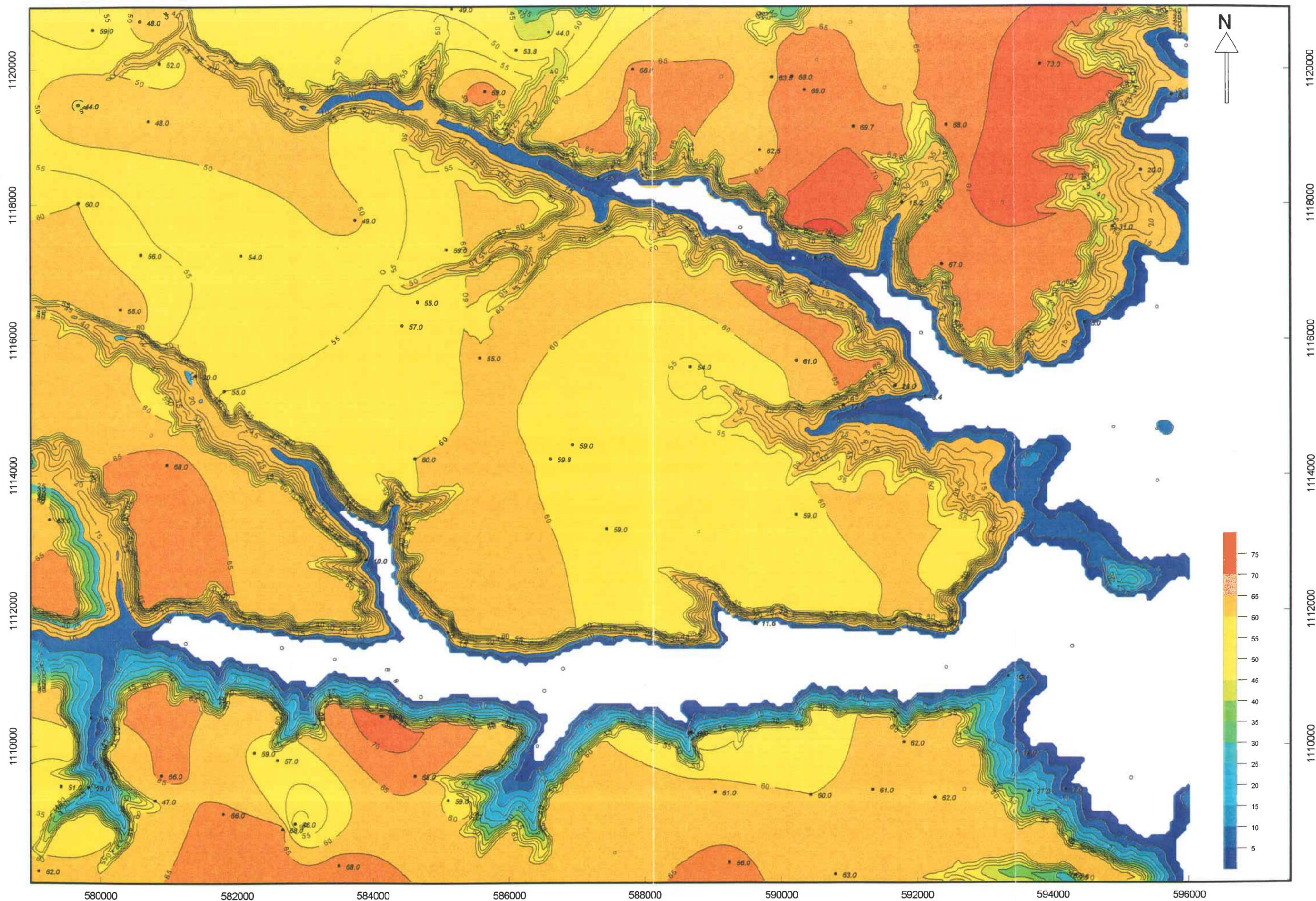


Fig. 7 : Carte des isopaques des Sables de Fontainebleau (1/50 000)

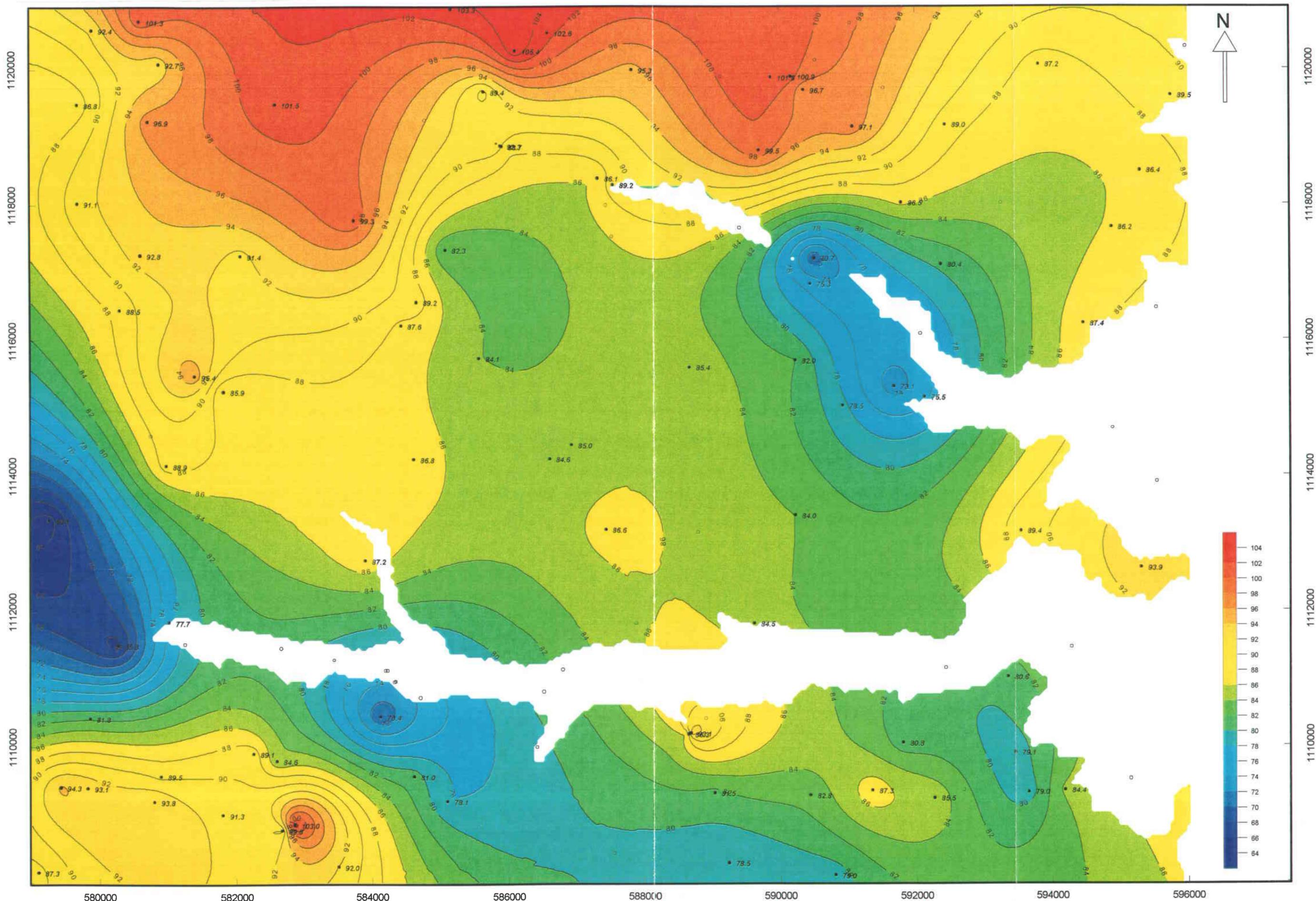


Fig. 8 : Carte des isohypses du « mur » des Sables de Fontainebleau (1/50 000)

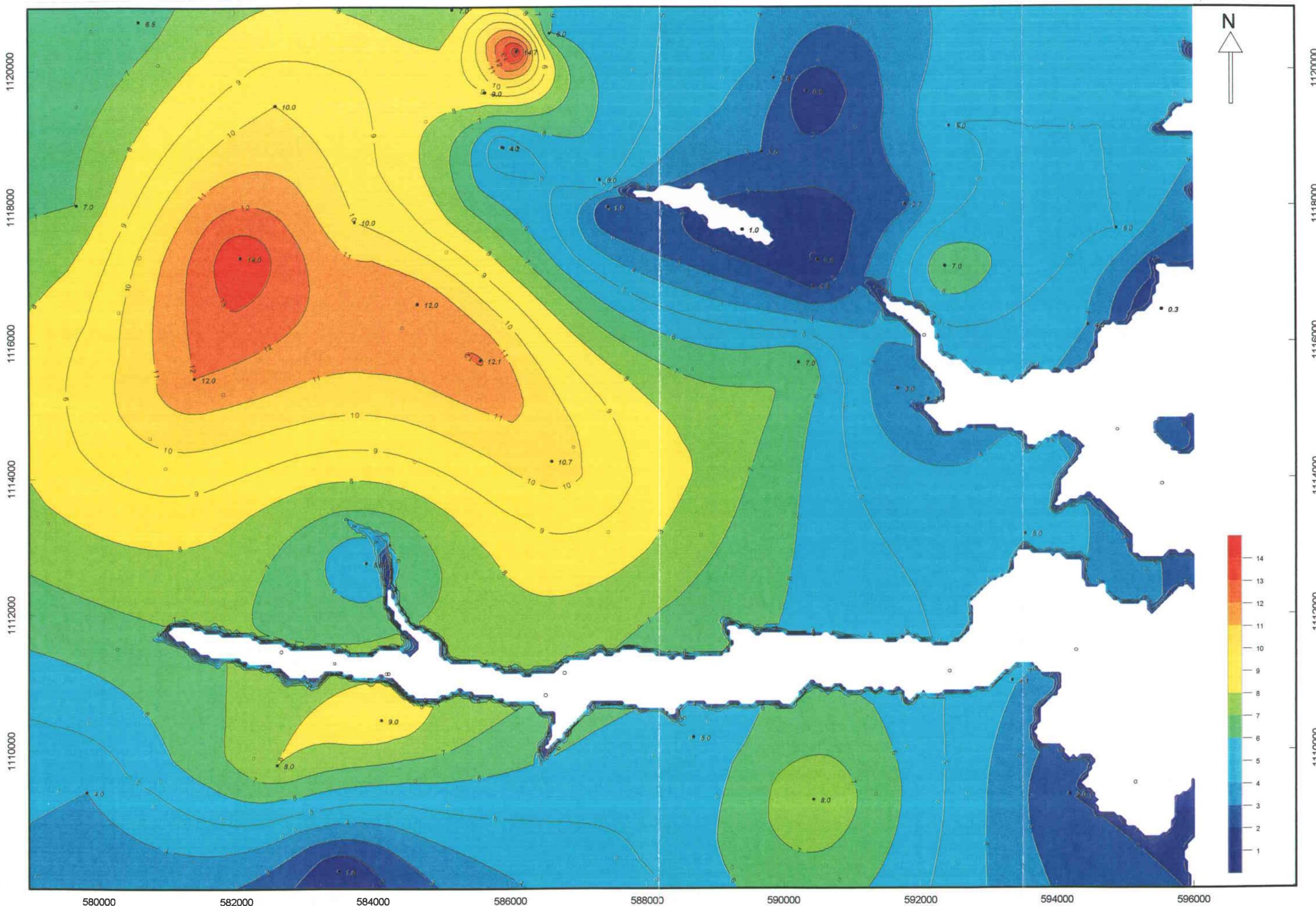


Fig. 9 : Carte des isopaches des Marnes à Huîtres s.l. (1/50 000)

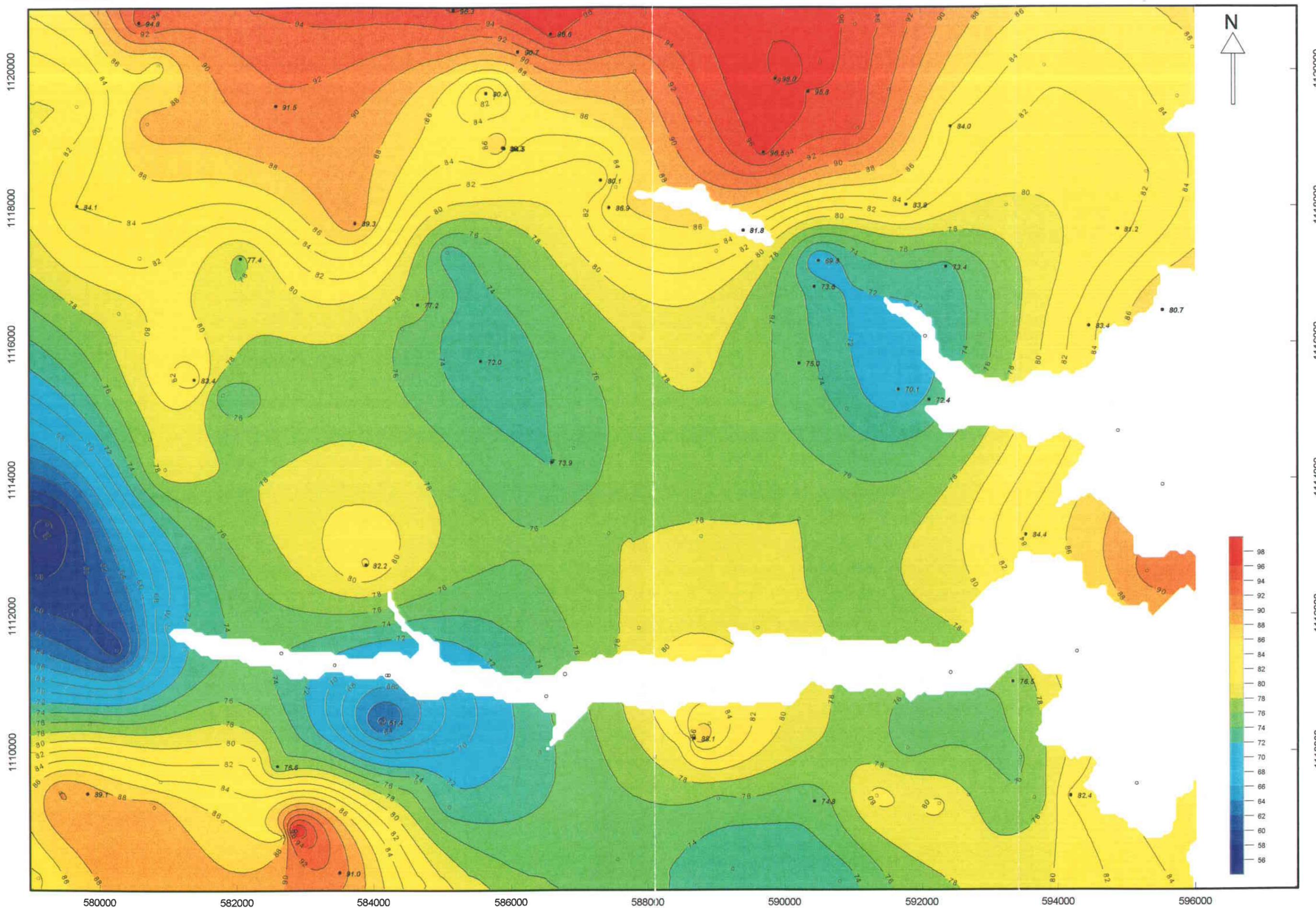


Fig. 10 : Carte des isohypses du « mur » des Marnes à Huîtres s.l. (1/50 000)

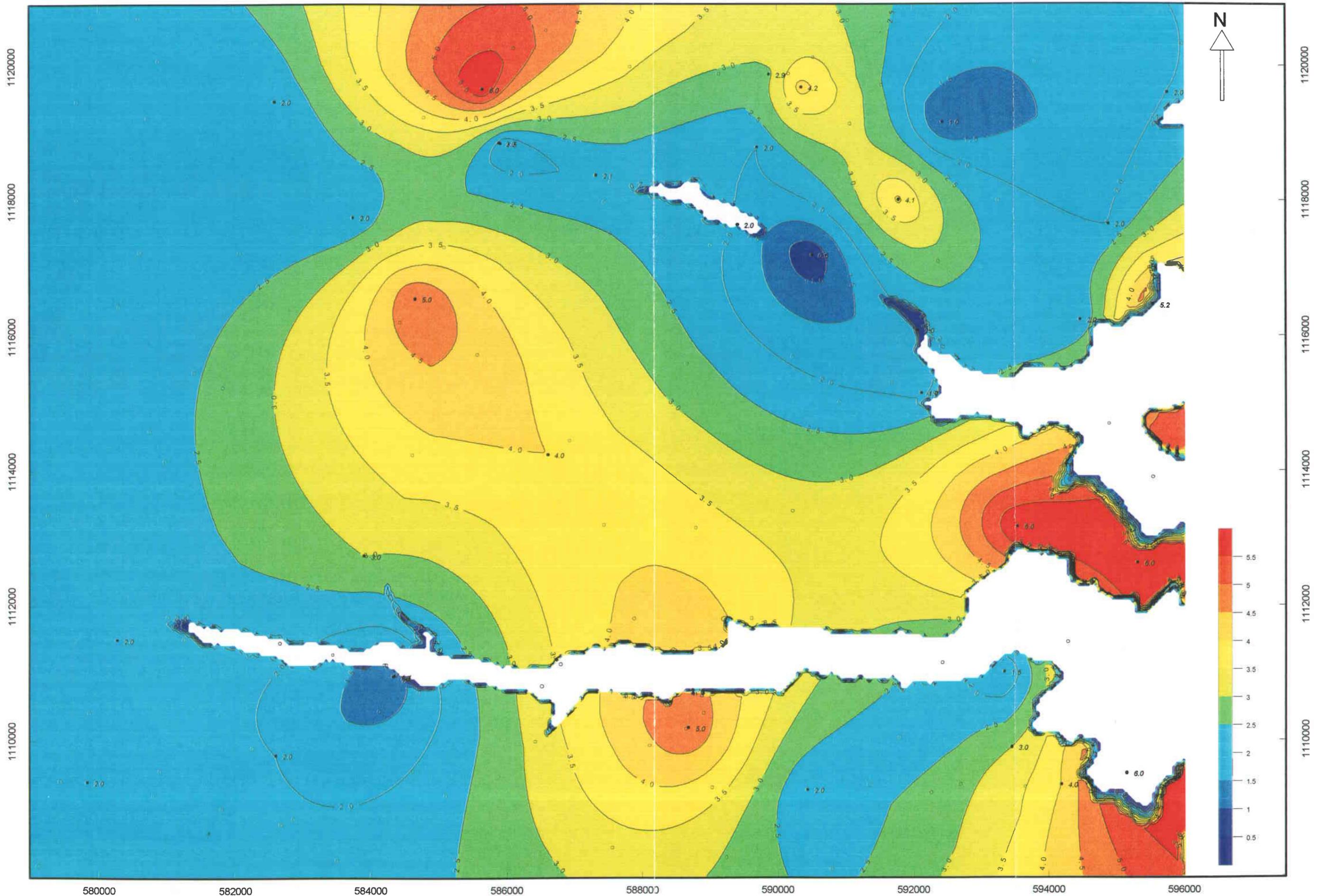


Fig. 11 : Carte des isopaches de la Formation de Brie s.l. (1/50 000)

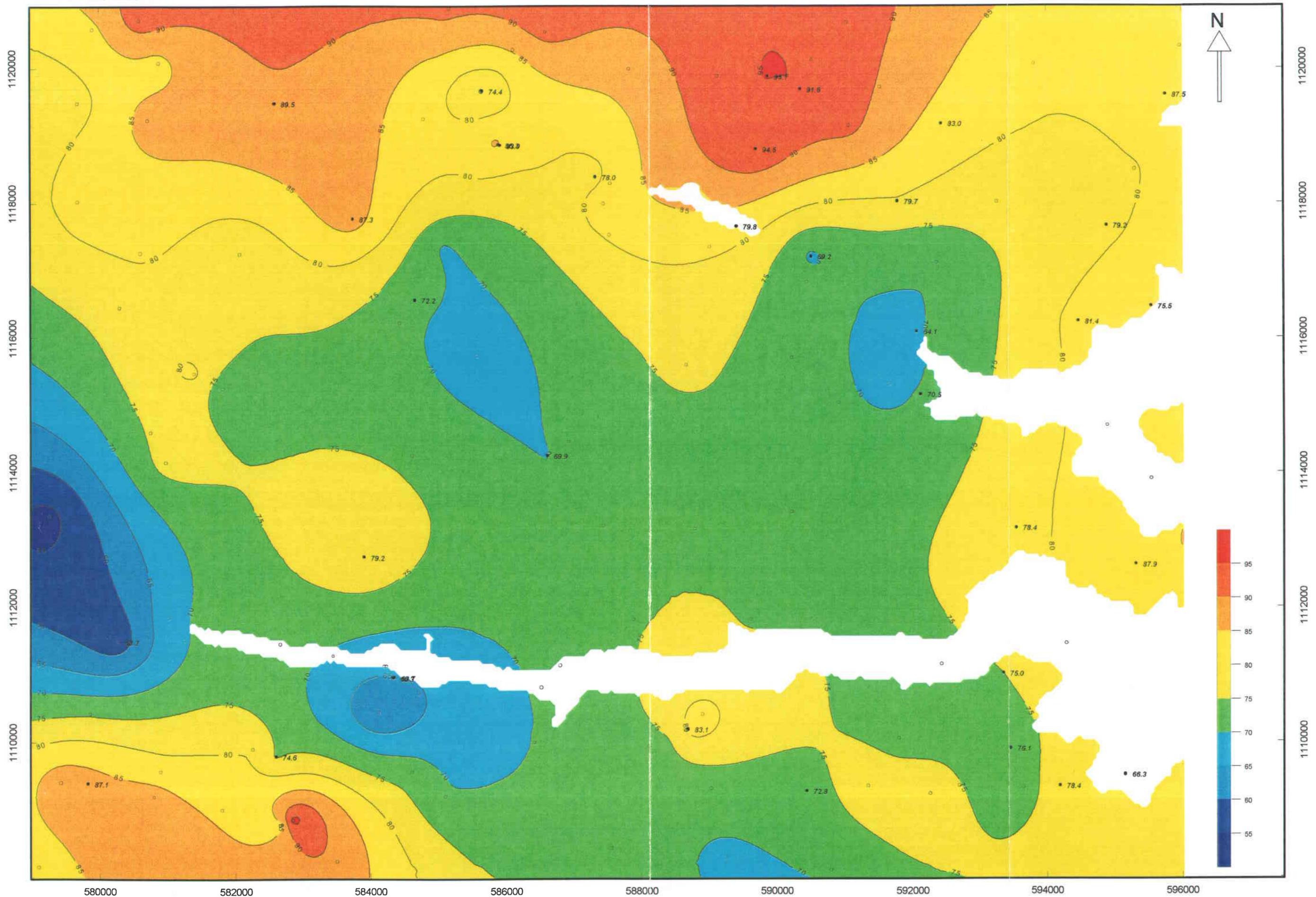


Fig. 12 : Carte des isohypses du « mur » de la Formation de Brie s.l. (1/50 000)



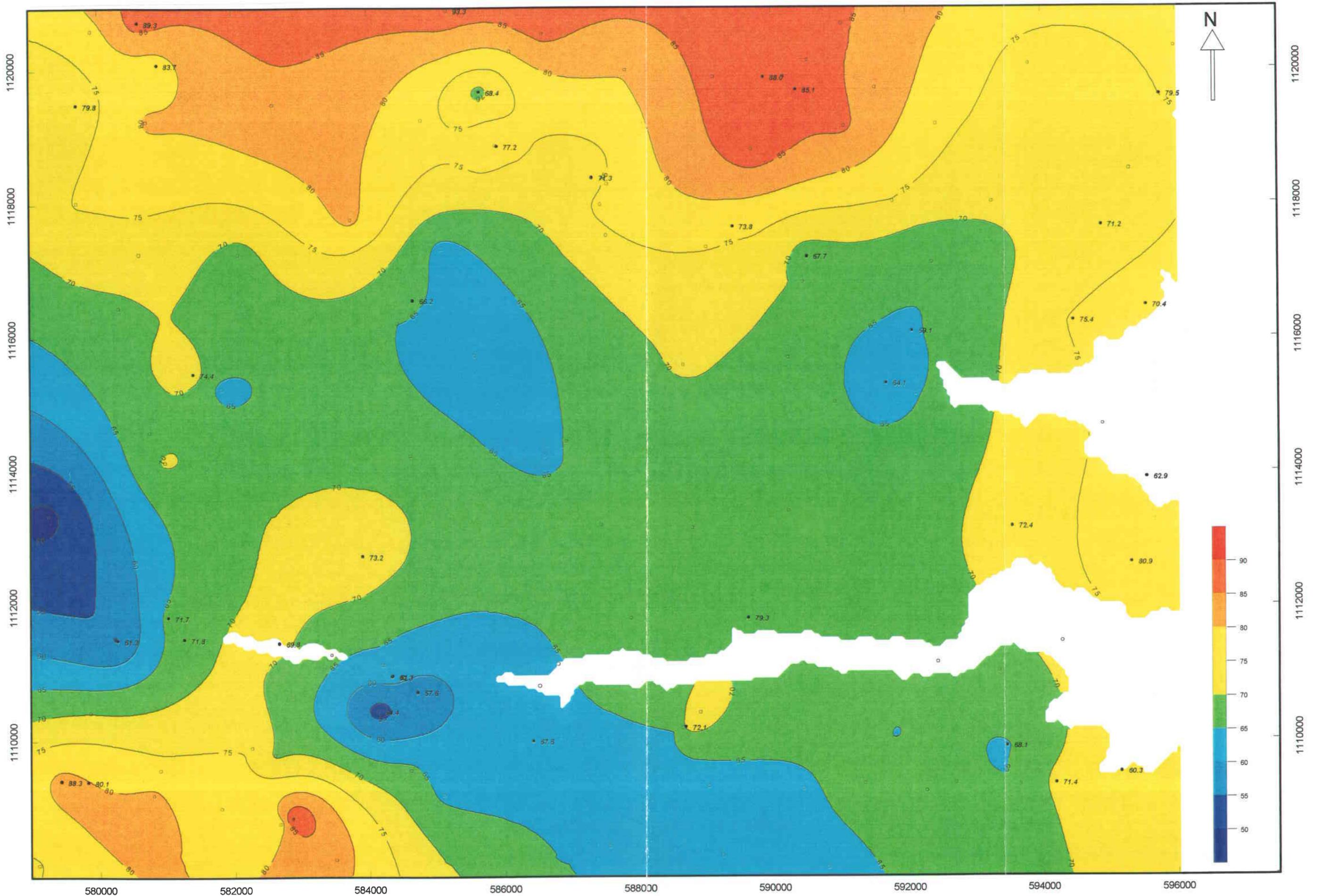


Fig. 14 : Carte des isohypses du « mur » de l'Argile verte s.l. (1/50 000)

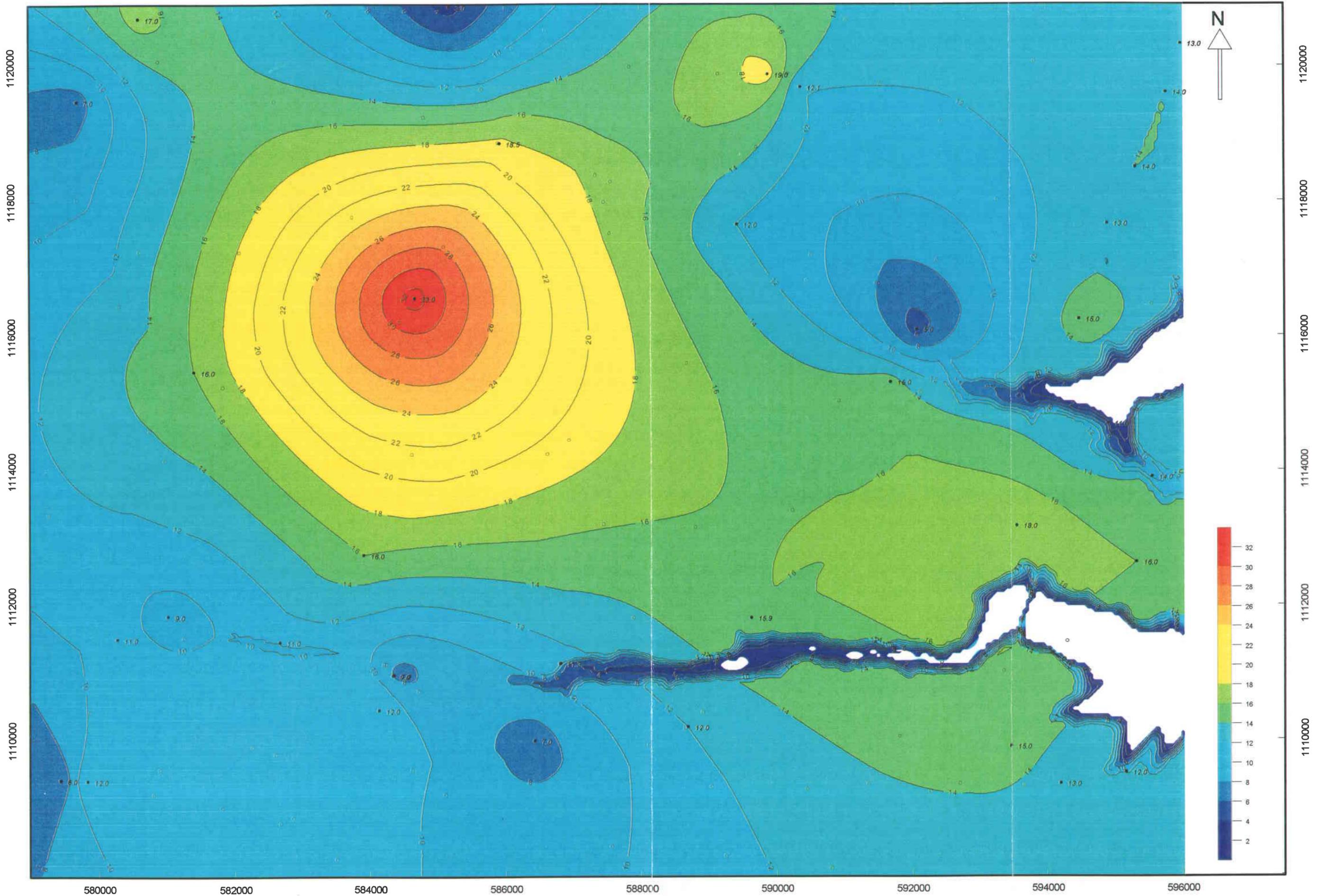


Fig. 15 : Carte des isopaques des Marnes supragypseuses (1/50 000)

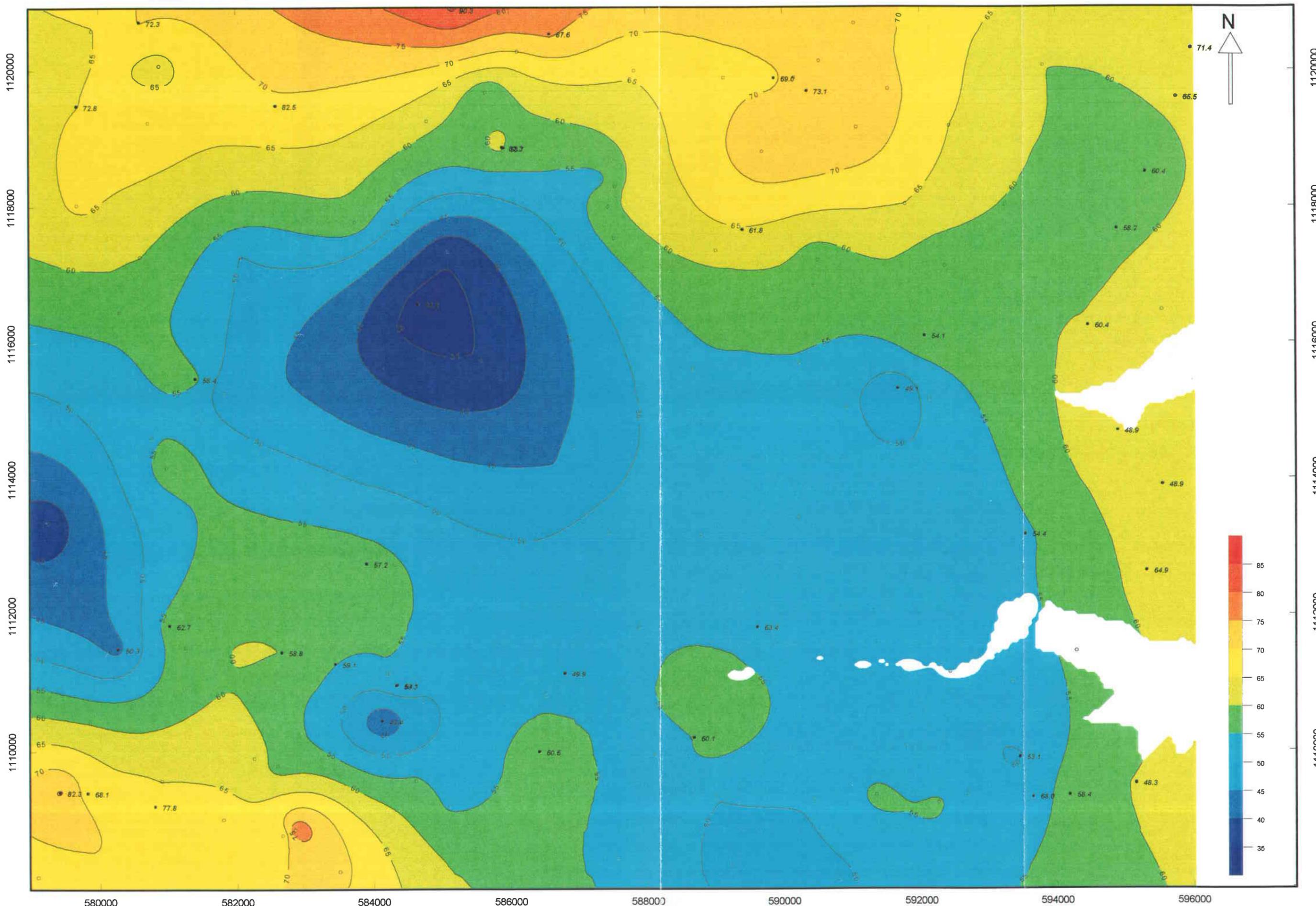
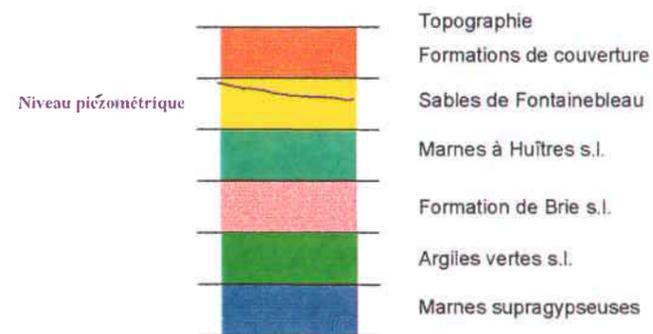
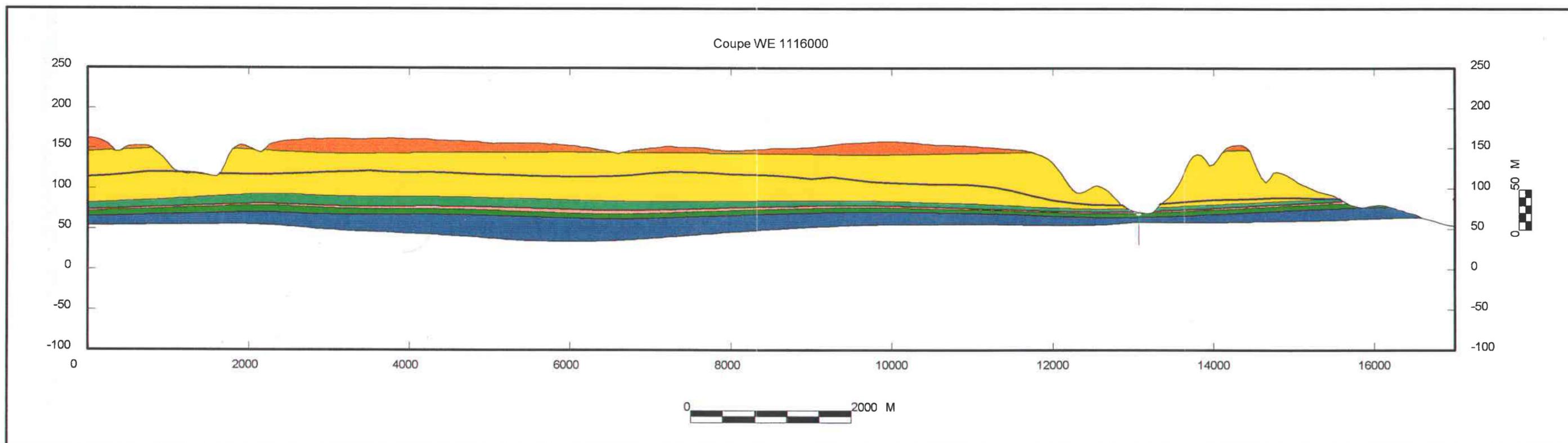
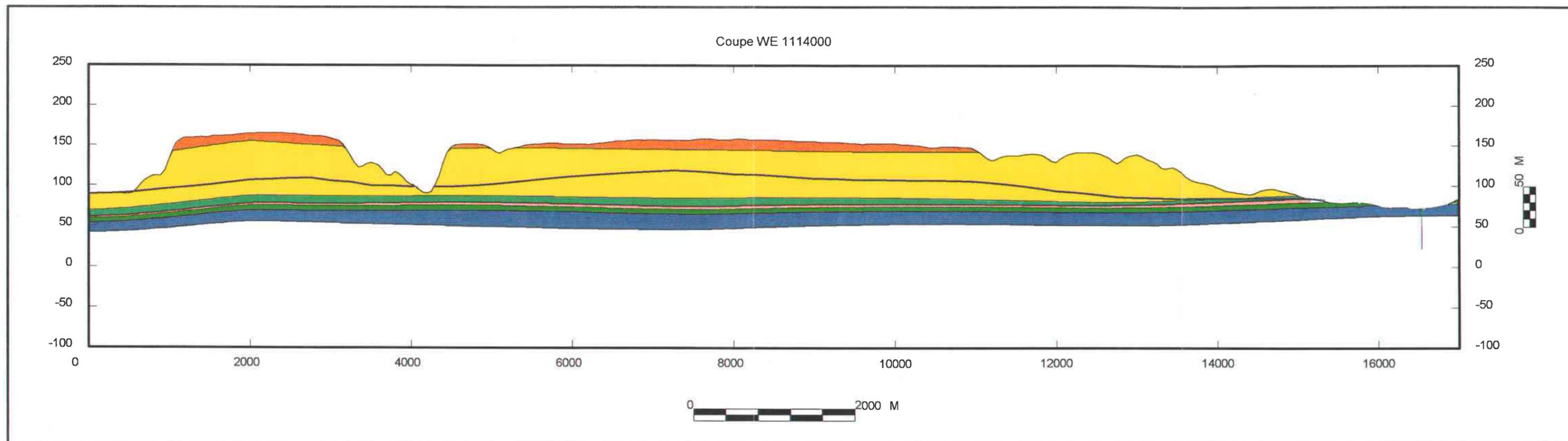
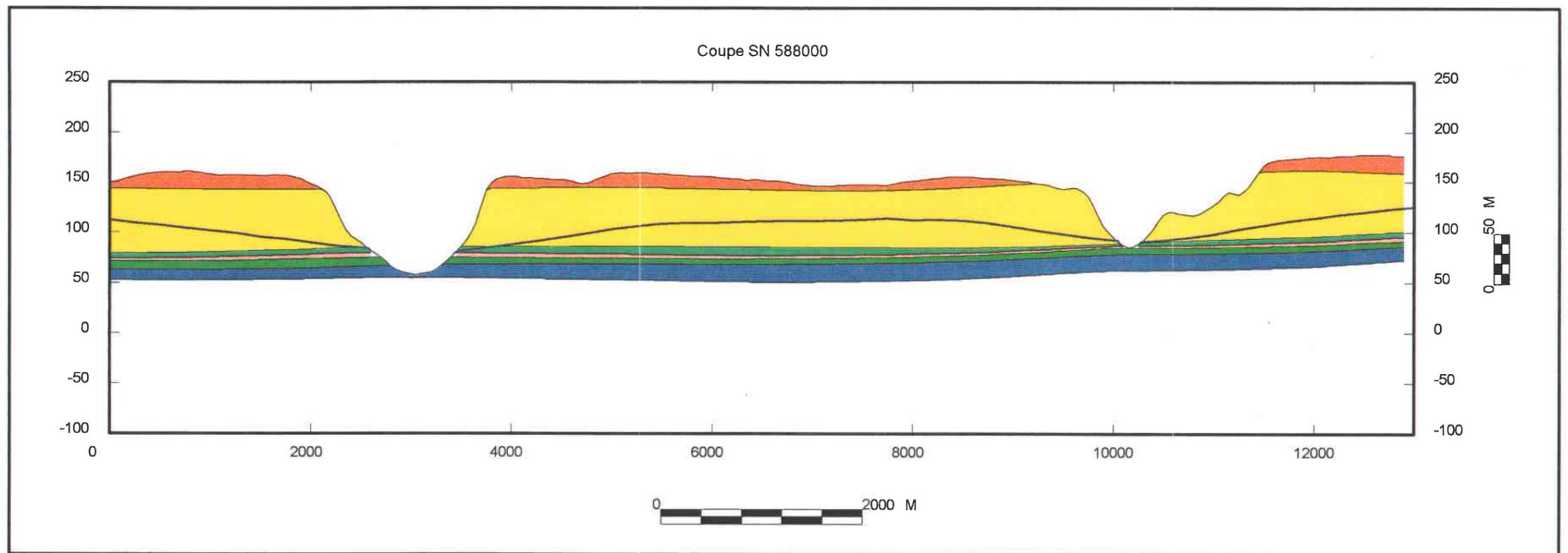
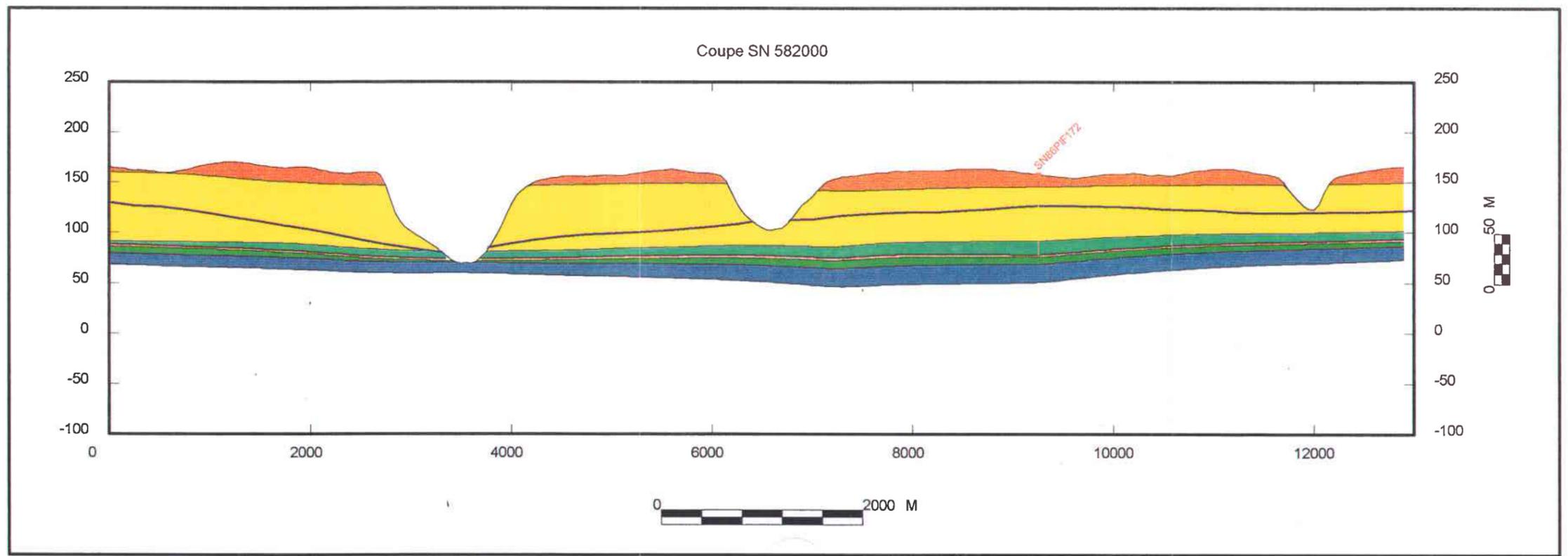


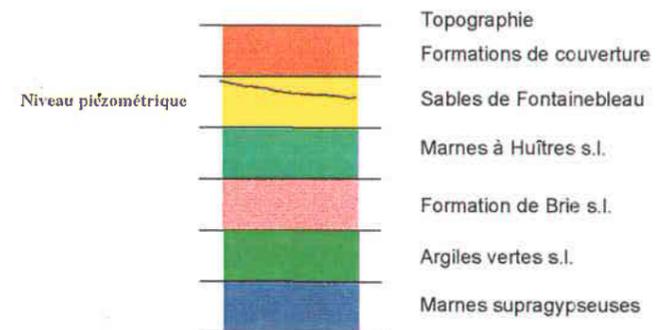
Fig. 16 : Carte des isohypses du « mur » des Marnes supragypsées (1/50 000)



**Fig. 17 : Coupes géologiques Ouest-Est (éch. horiz. : 1/50 000) (voir localisation en figure 2)**



Etude hydrogéologique du plateau de Saclay



Rapport BRGM R 40840

Fig. 18 : Coupes géologiques Sud-Nord (éch. horiz. : 1/50 000) (voir localisation en figure 2)

## 3. Caractéristiques hydrogéologiques

### 3.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Le CEA Saclay est situé sur un plateau limité au nord par la Bièvre et au sud par l'Yvette (Figure 3). Ces limites naturelles définissent un système aquifère constitué de deux nappes superposées reposant sur un substratum constitué par les Marnes à Huîtres et les Marnes vertes.

Ces deux nappes sont :

- La nappe superficielle (limons des plateaux et argile à Meulière)
- La nappe des Sables de Fontainebleau

La nappe superficielle est contenue dans les formations de surface qui regroupent les limons de plateau déposés sur un sable granitique localement argileux, lui-même reposant sur l'Argile à meulière de Montmorency. Parler de nappe pour caractériser ces formations constitue en fait un abus de langage car on a plutôt affaire à une série de lentilles aquifères perchées, d'extension et d'épaisseur variables. Ces lentilles ne sont pas en continuité hydraulique à l'inverse de ce qui définit une nappe aquifère.

La nappe aquifère principale est celle qui est contenue dans le réservoir des Sables de Fontainebleau. Ce réservoir repose sur un substratum peu perméable constitué des Marnes à Huîtres et des Marnes vertes. Ces niveaux séparent la nappe des Sables de Fontainebleau de la nappe du Calcaire de Champigny, peu aquifère dans ce secteur.

Les cartes géologiques (feuilles 218, Rambouillet et 219, Corbeil) montrent que les Sables de Fontainebleau affleurent dans les vallées et dans la partie est du plateau. Sur tout le plateau, ce sont les limons de plateau que l'on observe à l'affleurement. Les Marnes à Huîtres et les Marnes vertes, constituant le substratum de la nappe des Sables de Fontainebleau, affleurent principalement dans la vallée de l'Yvette et dans la vallée de la Mérançaise ainsi qu'à l'est du plateau. Au niveau des vallées, la nappe se déverse soit par une ligne de sources lorsque le substratum (Marnes à Huîtres et Marnes vertes) est bien marqué à l'affleurement, soit par l'intermédiaire des éboulis et des colluvions.

L'alimentation de la nappe des Sables de Fontainebleau se fait soit de manière directe par la pluie efficace dans les zones d'affleurement des sables, soit de manière indirecte par infiltration des eaux superficielles à travers les Argiles à Meulière.

Ces caractéristiques générales donnent une idée du fonctionnement du système mais demandent à être affinées. Les points à examiner concernent les limites du système, l'écoulement de la nappe, les mécanismes d'alimentation et de drainage. On a vu dans l'étude géologique que la géométrie des formations de couverture est mal connue. Il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances de tracer une carte d'isopaques des Argiles à Meulière qui jouent un rôle important dans l'alimentation de la nappe des

Sables de Fontainebleau. Une meilleure connaissance de cette formation nécessiterait l'acquisition de données complémentaires sur le terrain.

### 3.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les paramètres hydrodynamiques d'une nappe sont la perméabilité<sup>1</sup>, la transmissivité et le coefficient d'emménagement. Ces paramètres sont conditionnés par la nature et la géométrie des terrains constituant l'aquifère et par le caractère libre ou captif de la nappe.

Dans le cas de sables, la perméabilité peut varier considérablement en fonction des paramètres pétrophysiques (taille et forme des grains, porosité, teneur en argile, cimentation), paramètres dépendant eux-mêmes des conditions de dépôt et de la diagenèse.

Les caractéristiques hydrodynamiques d'une nappe sont déterminées à partir de pompages d'essai de longue durée (supérieure à 24 heures). Malheureusement, de nombreux essais sur les forages d'eau sont de courte durée et ne fournissent que des valeurs de débit spécifique (rapport entre le débit de pompage et le rabattement correspondant en fin de pompage). Pour un forage donné, la transmissivité estimée par un essai de longue durée est généralement supérieure au débit spécifique qui inclut les pertes de charge dans le tubage et l'effet pariétal. Transmissivité et débit spécifique ne sont donc pas directement comparables.

Enfin le coefficient d'emménagement est très différent selon qu'il s'agit d'une nappe libre ou captive. Ici nous sommes uniquement en présence de nappes libres et le coefficient d'emménagement est égal à la porosité efficace.

#### 3.2.1. Nappe superficielle

Cette « nappe » qui, on l'a vu, est constituée de lentilles indépendantes ne constitue pas un réservoir exploitable pour des besoins en eau souterraine et n'a donc pas été testée en tant que tel.

Des essais ont néanmoins été réalisés par le CEA dans le cadre d'une étude hydrogéologique de l'étang de Villiers, étude qui avait pour but d'évaluer la contribution de l'étang à l'alimentation de la nappe des sables de Fontainebleau [3]. Deux tests de perméabilité ont été effectués sur le piézomètre P4, situés à proximité du forage F44.

Le premier test a été réalisé par pompage dans la nappe superficielle à débit constant et conduit à une perméabilité de  $10^{-8}$  m/s. Le second test a consisté à remplir d'eau le piézomètre pour solliciter la zone non-saturée ; il conduit à une perméabilité de  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s. Enfin à partir d'une expérience de traçage à la fluorescéine entre l'étang et P4 et en supposant une porosité connectée de 1%, le CEA arrive à une perméabilité des

---

<sup>1</sup> Pour la définitions des termes employés, cf. glossaire

formations superficielles de  $8 \cdot 10^{-6}$  m/s. Ces tests confirment le caractère hétérogène de ces formations.

Des modélisations des traçages ont été réalisées pour évaluer les flux d'infiltration des eaux de l'étang vers la nappe des sables de Fontainebleau. Ces simulations ont permis une estimation de l'ordre de grandeur des porosités connectées et des perméabilités des chemins de circulation entre l'étang et P4. Les valeurs retenues varient entre 0.1 et 5% pour la porosité connectée et entre  $4 \cdot 10^{-6}$  et  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s pour la perméabilité.

### 3.2.2. Nappe des Sables de Fontainebleau

On dénombre sur le secteur d'étude 24 forages sur lesquels a été réalisé un essai de débit pour tester la nappe des Sables de Fontainebleau. Pour 13 d'entre eux, une transmissivité a été calculée. La perméabilité est une valeur moyennée sur toute la hauteur de l'aquifère ; elle est égale au rapport de la transmissivité par la hauteur utile (ou hauteur de sable saturé en eau).

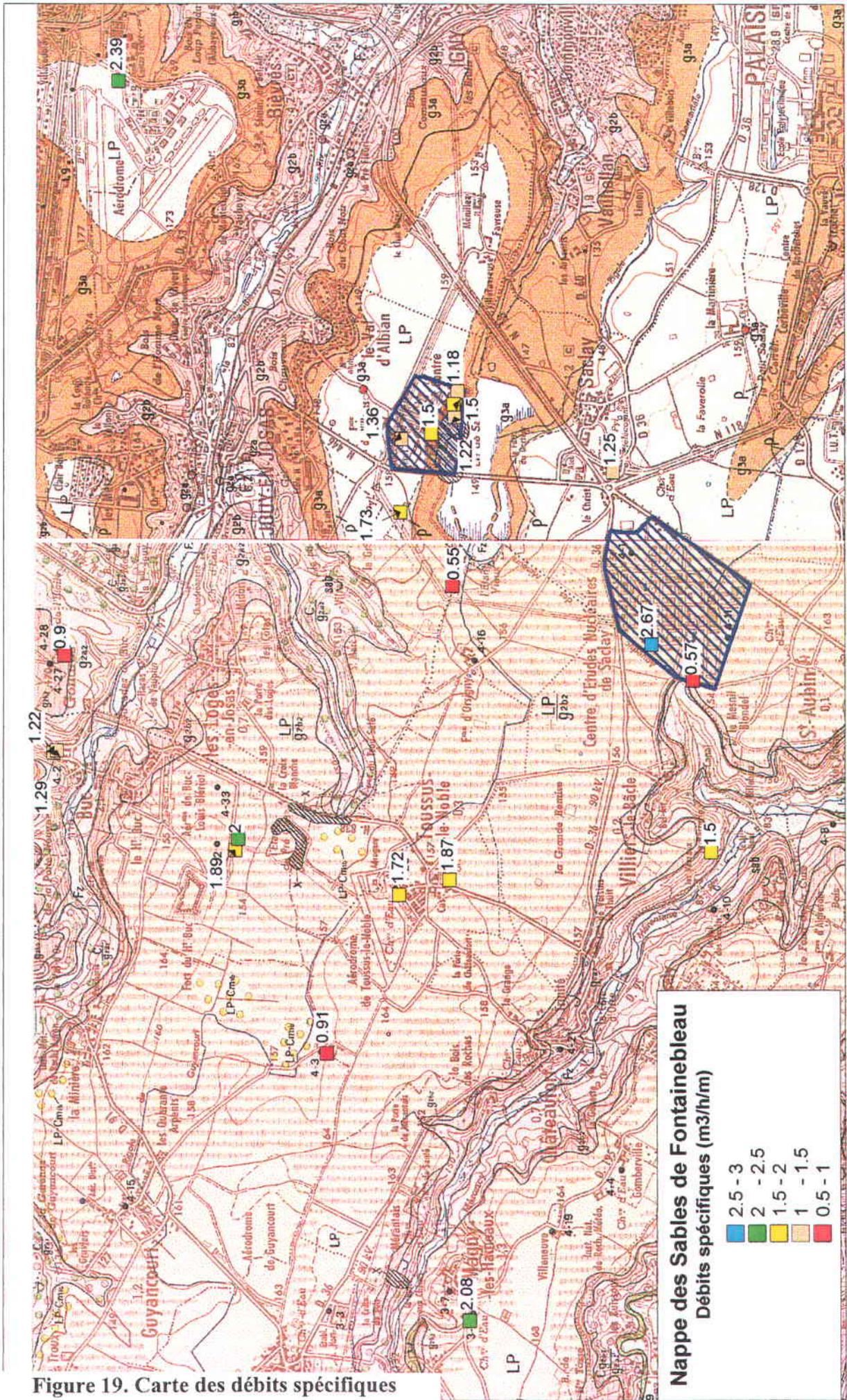
Parmi ces forages, cinq sont situés sur le site du CEA Saclay et utilisés comme piézomètres pour le suivi de la nappe (F41, F42, F43, F44 et F45). Une étude de contrôle des caractéristiques de ces piézomètres a été réalisée par le CEA en 1995 avec de nouveaux essais de pompage [4]. L'interprétation de ces pompages donne des transmissivités beaucoup plus faibles que celles obtenues sur les autres forages. Ces faibles transmissivités ont été interprétées comme résultant d'un colmatage des crépines.

Les très faibles valeurs de débit spécifique obtenues pour les forages F41, F42 et F45 ( $< 0.2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ) indiquent vraisemblablement un colmatage des crépines. Néanmoins pour les forages F41 et F45, le test n'a pas duré suffisamment longtemps pour pouvoir être interprété correctement. Dans les deux autres cas, F43 et F44, le test a été interprété par la méthode de Jacob de manière erronée. Pour le F44 par exemple (cf. Annexe 1), l'interprétation a pris en compte l'alignement des points entre 20 et 200 secondes, période pendant laquelle l'approximation de Jacob n'est pas valable, comme le montre l'interprétation de l'essai réalisé sur le forage de la base de Villacoublay (02191X0062) pour lequel un pompage de 24 heures a été réalisé [6]. En réinterprétant ces deux tests, on obtient des perméabilités de  $1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-5}$ , très proches de celles observées sur les autres forages.

L'ensemble des données hydrodynamiques est regroupé en annexe (Annexe 1) et synthétisé dans le tableau suivant (Tableau 1) et les cartes des différents paramètres (Figure 19, Figure 20, Figure 21). Ces paramètres ont des valeurs relativement proches, ce qui traduit une bonne homogénéité des Sables de Fontainebleau dans ce secteur.

| débit                       | débit spécifique                          | transmissivité   | perméabilité                                    |
|-----------------------------|---|--|---|
| $< 30 \text{ m}^3/\text{h}$ | $0.5 - 2.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ | $2.6 \cdot 10^{-4} - 8.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ | $7 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ |

**Tableau 1. Paramètres hydrodynamiques de la nappe des Sables de Fontainebleau**



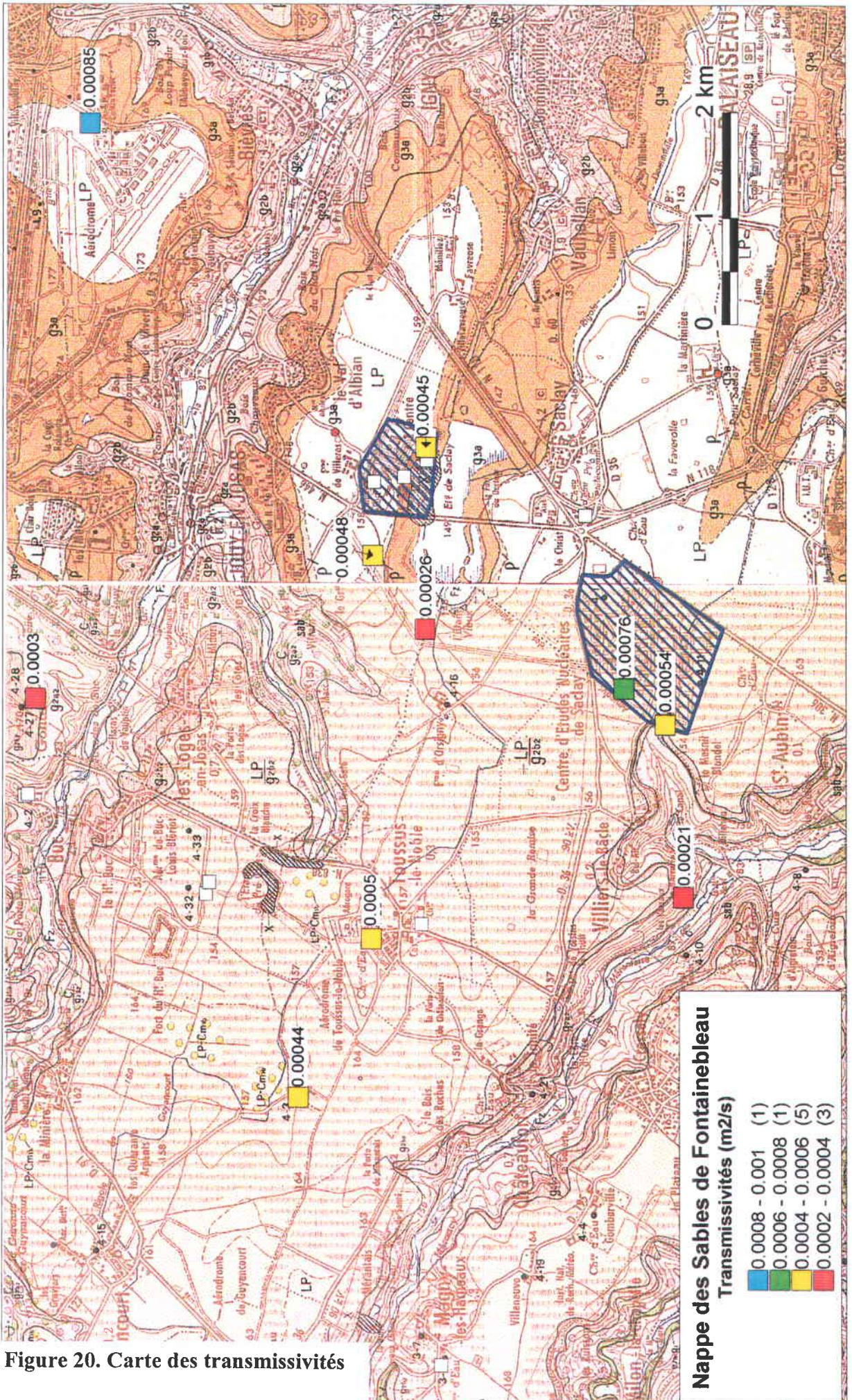


Figure 20. Carte des transmissivités

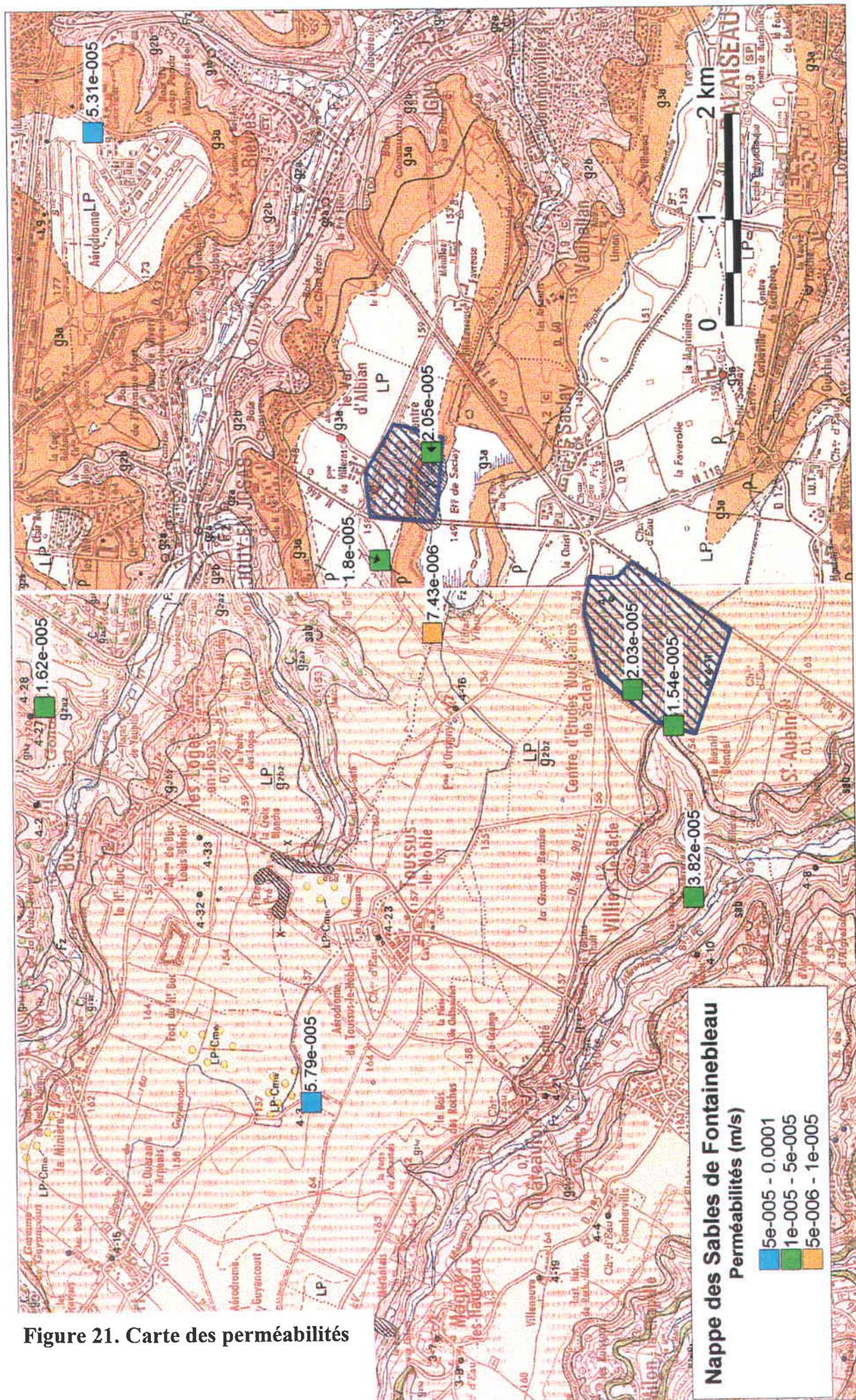


Figure 21. Carte des perméabilités

### 3.3. EXPLOITATION DE LA NAPPE

Sur le plateau de Saclay, la nappe des Sables de Fontainebleau n'est quasiment pas exploitée. Dans le fichier des captages de l'Essonne, on dénombre un captage d'eau industrielle sur le Centre d'Essais des Propulseurs du CEA (02191X0049) et une source captée par un monastère (02191X0061). On ne compte en particulier aucun captage pour l'alimentation en eau potable des communes du plateau.

Le fichier de la DDAF de l'Essonne mis à jour en 1999 ne fait apparaître aucun forage agricole sur la zone d'étude. Il faut néanmoins signaler la réalisation de deux forages en décembre 1997 sur la commune de Saclay aux lieux-dits « Les Hautes Bornes » et Ville Dombe » (02184X0061 et 02191X0081). Ces deux forages d'irrigation sont donnés pour un débit d'exploitation de 15 m<sup>3</sup>/h chacun [5].

Le fichier des captages des Yvelines fait apparaître 3 forages situés sur la commune de Buc, au nord-ouest de la zone d'étude : un forage utilisé pour l'arrosage du golf de la Boulie exploité à 7 m<sup>3</sup>/h (02184X0027), et deux forages industriels exploités à 18 et 22 m<sup>3</sup>/h (02184X0032 et 02184X0040).

### 3.4. VARIATIONS PIEZOMETRIQUES

Le CEA Saclay utilise cinq piézomètres situés à l'intérieur du centre pour suivre l'évolution du niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau. Ces piézomètres sont suivis depuis 1982 à raison d'une mesure par mois (Figure 22).

On observe une grande similitude entre les courbes à l'exception du point F43 qui semble être, à certaines périodes, influencé par des pompages. Pour les autres points, l'amplitude de variation du niveau piézométrique est faible, inférieure à 1.5 m sur 18 ans. Ce comportement est tout à fait classique pour la nappe des Sables de Fontainebleau qui peut même présenter des variations d'amplitude encore plus faibles. C'est le cas dans le secteur de Les-Essarts-le-Roi à une vingtaine de km à l'ouest de Saclay. Ce piézomètre est suivi par le BRGM depuis 40 ans et son amplitude de fluctuation est inférieure à un mètre (Figure 23). Il a un comportement similaire aux piézomètres du CEA jusqu'en 1992.

On a vu que l'alimentation de la nappe pouvait provenir directement des précipitations ou par infiltration à partir de la nappe superficielle. On observe que la nappe ne réagit pas immédiatement aux épisodes pluvieux. Par exemple durant l'hiver 1987-1988, caractérisé par des pluies efficaces très importantes, le niveau de la nappe a baissé. De même on observe une baisse globale du niveau de la nappe entre 1990 et 1994 alors que le déficit de précipitations apparaît dès l'hiver 1988-1989 et que les autres nappes d'Ile-de-France (Calcaire de Beauce et Calcaire de Champagne) ont baissé dès 1989.

La comparaison de la piézométrie et de la pluie efficace tend à montrer que la nappe des Sables de Fontainebleau réagit avec une période de retard d'environ un an aux épisodes pluvieux (Figure 24). Ce retard est certainement lié à l'effet tampon de l'Argile à Meulière qui freine l'infiltration de l'eau dans la zone non-saturée. Dans l'étude du

BURGEAP, ce retard est estimé à une période de 7 à 9 ans, en comparant la piézométrie et la moyenne glissante sur 5 ans de la pluie efficace. Cette comparaison apparaît peu probante. Un calcul effectué à partir d'un modèle global, en calant les chroniques piézométriques avec les données météorologiques, permettrait de lever ce doute.

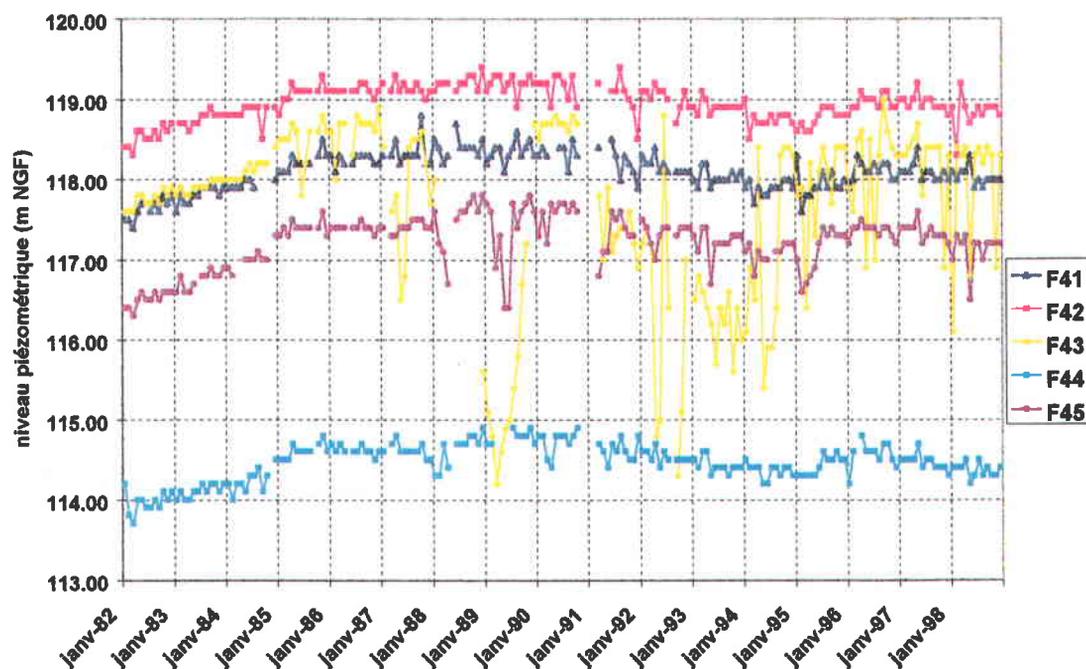


Figure 22. Evolution du niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau au droit du CEA Saclay

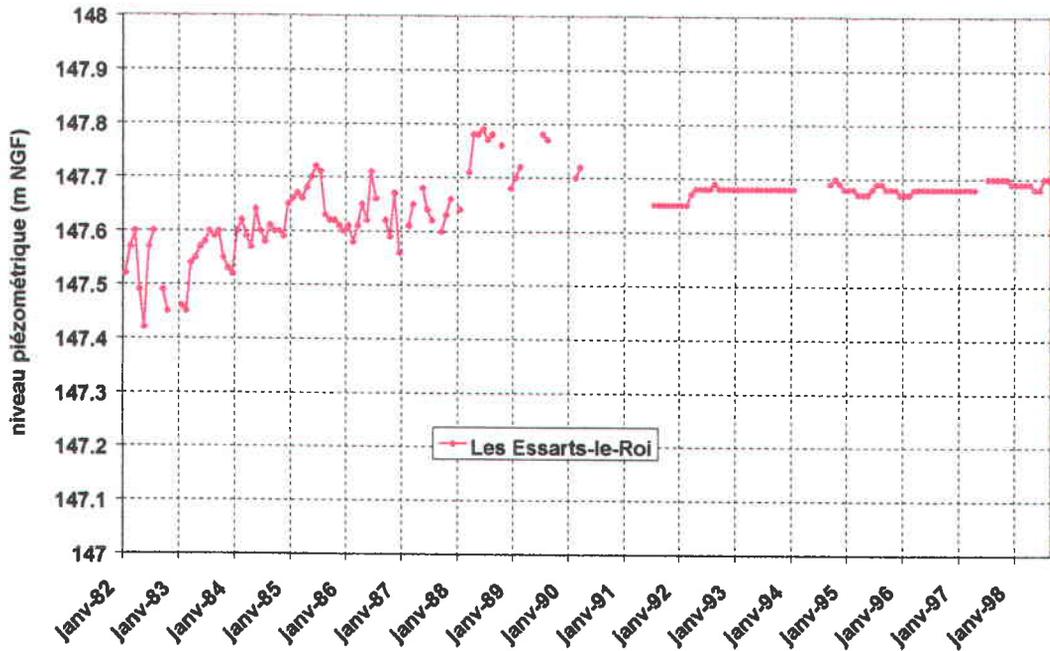


Figure 23. Evolution du niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau à 20 km à l'ouest du CEA

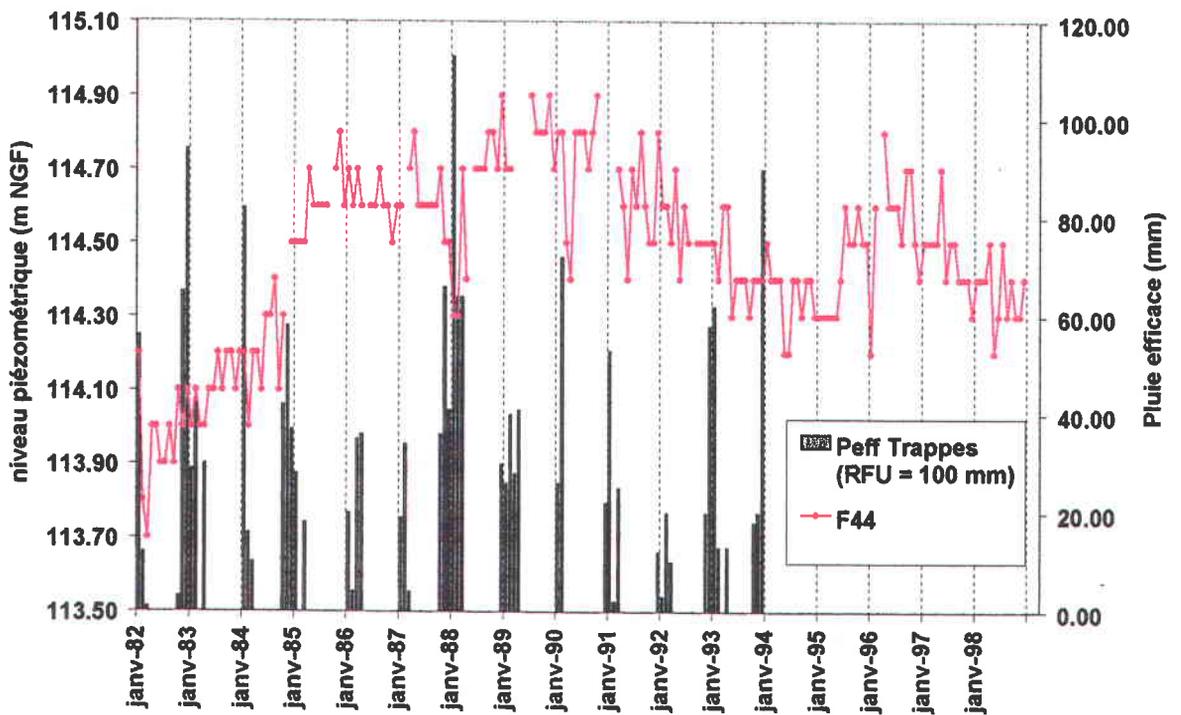


Figure 24. Relation entre la piézométrie de la nappe des Sables de Fontainebleau et la pluie efficace

### **3.5. SURFACE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DES SABLES DE FONTAINEBLEAU**

La carte piézométrique est l'outil de base pour appréhender l'écoulement d'une nappe souterraine et caler un modèle hydrodynamique. Le plateau de Saclay contient deux nappes, une nappe de surface et la nappe des Sables de Fontainebleau, mais seule cette dernière a une surface piézométrique suffisamment étendue pour être cartographiée.

En effet, la « nappe » de surface se situe dans la couche d'Argiles à Meulière qui forme un ensemble de petits réservoirs discontinus dans des lentilles sableuses avec des niveaux piézométriques très variables. Ces niveaux peuvent se situer sous le CEA Saclay entre 2.5 et 11.5 mètres de profondeur avec des variations saisonnières pouvant atteindre 5 mètres.

A l'inverse l'aquifère des Sables de Fontainebleau constitue une nappe d'extension régionale présente sur l'ensemble du plateau.

#### **3.5.1. Elaboration de la carte piézométrique**

Nous disposons pour réaliser la carte piézométrique de la nappe des Sables de Fontainebleau de plus d'une centaine de mesures ponctuelles (Figure 25 et Annexe 2) :

- mesures directes : niveau d'eau mesuré sur 33 points d'eau (BSS)
- mesures indirectes : pour 74 carottages VT on a pu déduire le niveau de la nappe en utilisant le contraste de résistivité à l'interface de la zone non-saturée et de la zone saturée
- cote des sources : 24 sources ont été répertoriées sur les deux cartes IGN au 1:25.000 couvrant la zone (2315O et 2215E) ; ces sources correspondent à des points de déversement de la nappe, leur cote altimétrique correspond au niveau de la nappe.

Le niveau piézométrique variant au cours du temps, une carte piézométrique doit être établie à partir d'une campagne de mesures synchrones, généralement en période de hautes eaux ou de basses eaux. Dans le cas présent, nous avons vu que la nappe fluctuait peu ; il est donc tout à fait légitime de dresser une piézométrie à partir de mesures asynchrones.

La qualité d'une carte piézométrique repose sur le nombre de mesures ponctuelles et leur répartition dans l'espace, mais aussi sur la précision des repères altimétriques. Les points de mesures ont tous été recalés par rapport au MNT. La précision des repères altimétriques est de l'ordre du mètre.

Les mesures ponctuelles ont été interpolées par une méthode de krigeage avec variogramme linéaire sans dérive. L'étude géologique a montré que la vallée de l'Yvette isolait totalement la nappe des Sables de Fontainebleau au sud et au nord. Pour l'interpolation, nous avons donc pris en compte deux zones indépendantes séparées par la vallée de l'Yvette.

Le résultat de l'interpolation a ensuite été repris à la main pour l'élaboration d'une carte piézométrique prenant en compte la géométrie du système et en particulier les limites d'extension des Sables de Fontainebleau (Figure 26). Par ailleurs certains contours ont été repris pour supprimer des artefacts dus à des valeurs erronées ou à des niveaux piézométriques influencés. Sur le site du Centre d'Essai des Propulseurs, par exemple, on observe des variations importantes de niveau piézométrique (plus de 5 m) pour des points très proches (situés à moins de 150 m). Cette différence peut être due à l'exploitation du forage F5 (02191X0049) qui provoquerait localement un rabattement de la nappe.

La précision des mesures ponctuelles étant de l'ordre du mètre, la carte a été dressée avec des courbes isopièzes équidistantes de 5 m.

### **3.5.2. Interprétation de la carte piézométrique**

La carte piézométrique montre que l'écoulement principal de la nappe est NO-SE sur le plateau mais qu'il est rapidement influencé par les vallées : les lignes de courant changent alors de direction et convergent vers les rivières. La ligne de partage des eaux souterraines passe approximativement par Montigny-le-Bretonneux, Toussus-le-Noble, Saclay et Palaiseau. Cette ligne de partage des eaux souterraines apparaît relativement stable dans la mesure où les fluctuations naturelles de la nappe sont faibles (moins de 2 mètres) et où les prélèvements dans la nappe sont limités. Elle serait bien entendu susceptible d'être modifiée si dans l'avenir des prélèvements importants étaient réalisés.

L'influence des cours d'eau se manifeste différemment au sud et au nord. Au nord les alluvions de la Bièvre reposent sur les Sables de Fontainebleau à l'exception du secteur de Jouy-en-Josas et en aval de Bièvres. La nappe des Sables de Fontainebleau est donc en continuité hydraulique de part et d'autre de la Bièvre avec la nappe des alluvions et est drainée par la Bièvre à l'exception de la zone située la plus à l'est. Au sud, la vallée de l'Yvette entaille la formation des Sables de Fontainebleau et les alluvions reposent directement sur les Marnes à Huîtres ou les Marnes vertes. La nappe des Sables de Fontainebleau n'est pas en liaison avec le cours d'eau et se déverse au contact des marnes par une série de sources situées dans les vallées. Ces sources sont particulièrement nombreuses dans la vallée de la Mérantaise. A l'est, les Sables de Fontainebleau se rétrécissent et l'écoulement de la nappe est limité par la butte de Champlan qui provoque une inversion du sens d'écoulement.

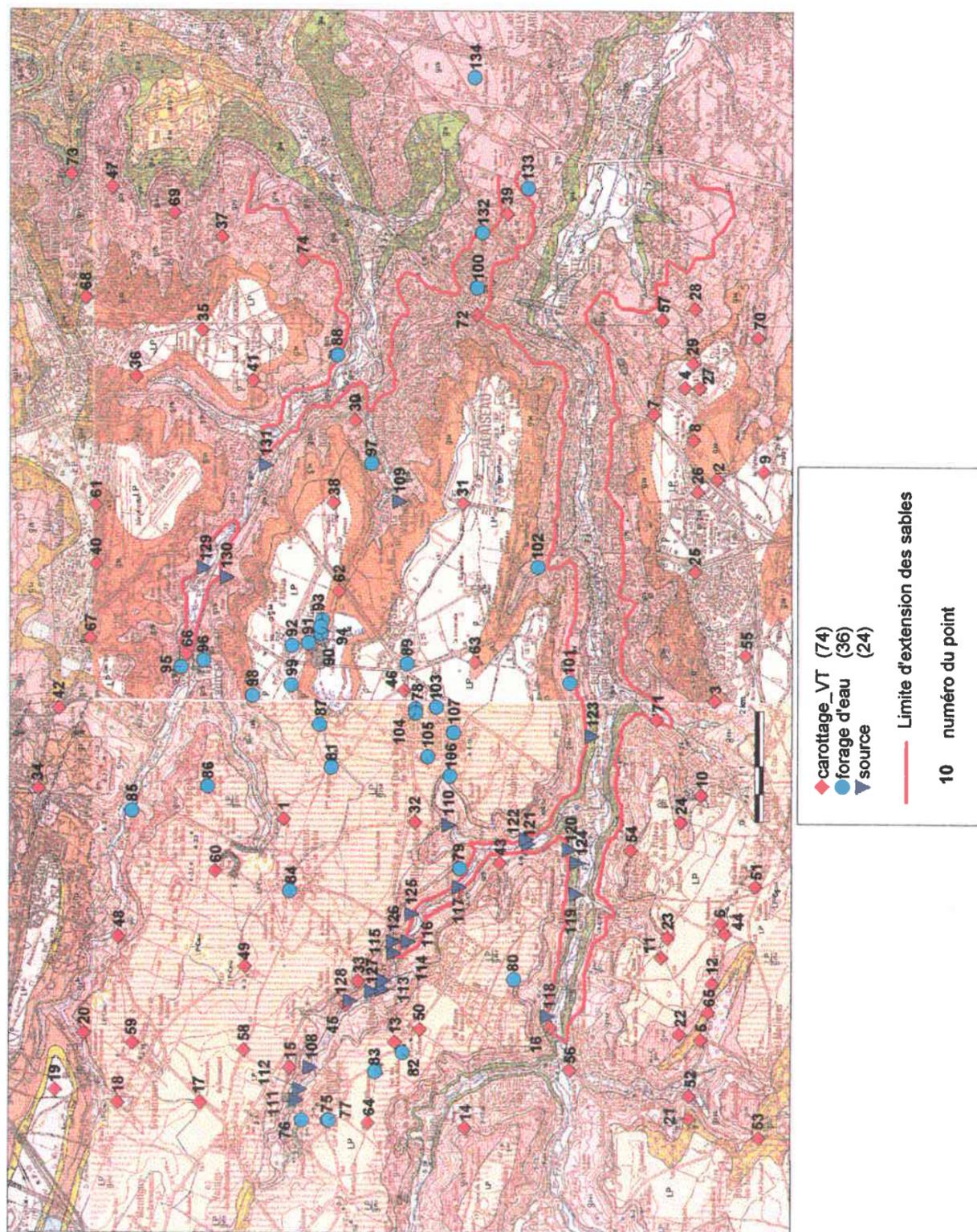


Figure 25. Répartition des données relatives à la piézométrie de la nappe des Sables de Fontainebleau

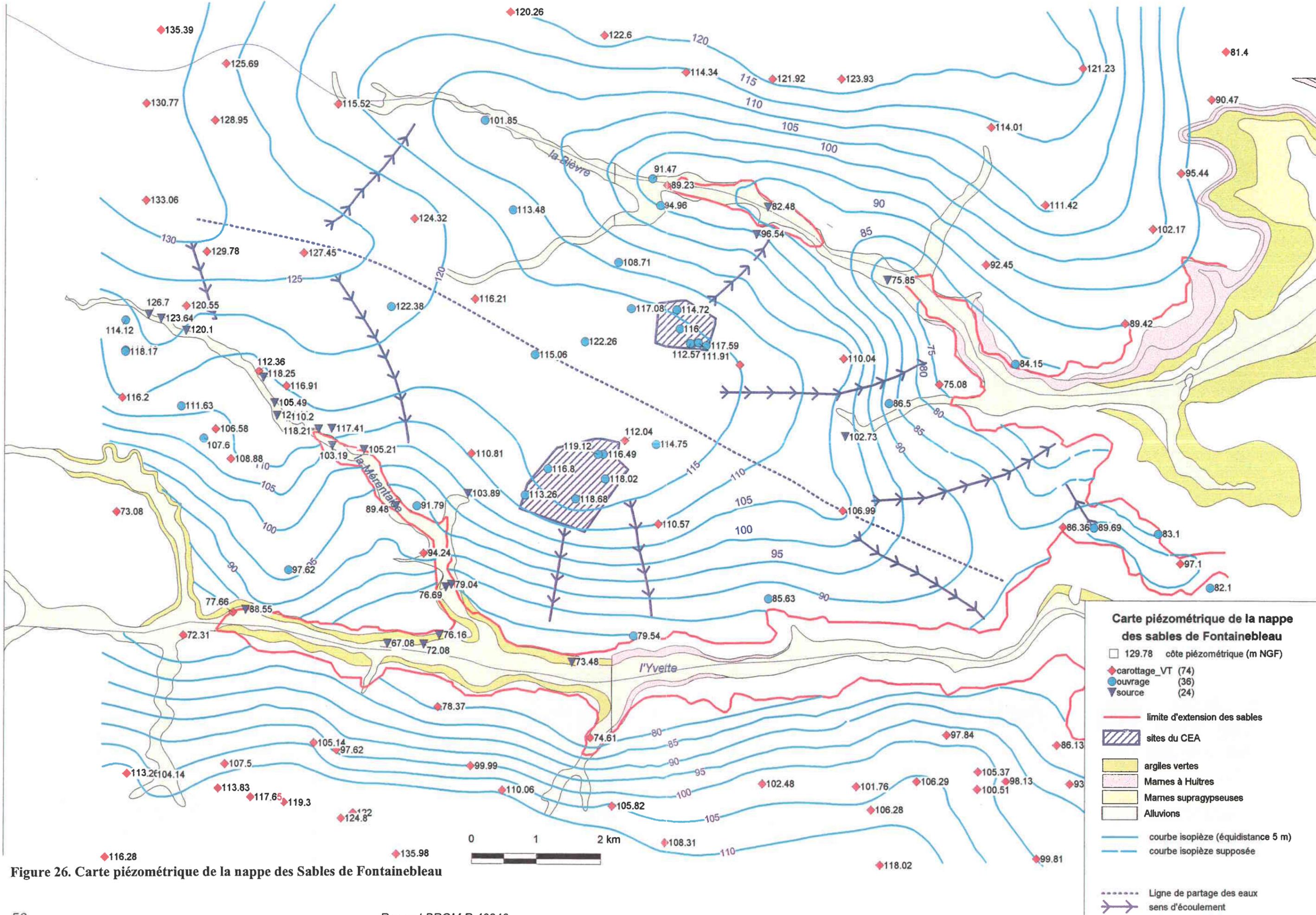


Figure 26. Carte piézométrique de la nappe des Sables de Fontainebleau

### 3.5.3. Profil piézométrique

Le profil piézométrique nord-sud de la nappe des Sables de Fontainebleau passant par le CEA Saclay montre que la nappe est libre avec un niveau piézométrique situé au dessous du toit des sables (Figure 27).

Le point le plus haut de la nappe se situe à l'ouest des étangs de Saclay, là où l'épaisseur des formations recouvrant les Sables de Fontainebleau est la plus faible (4 à 6 m), ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface.

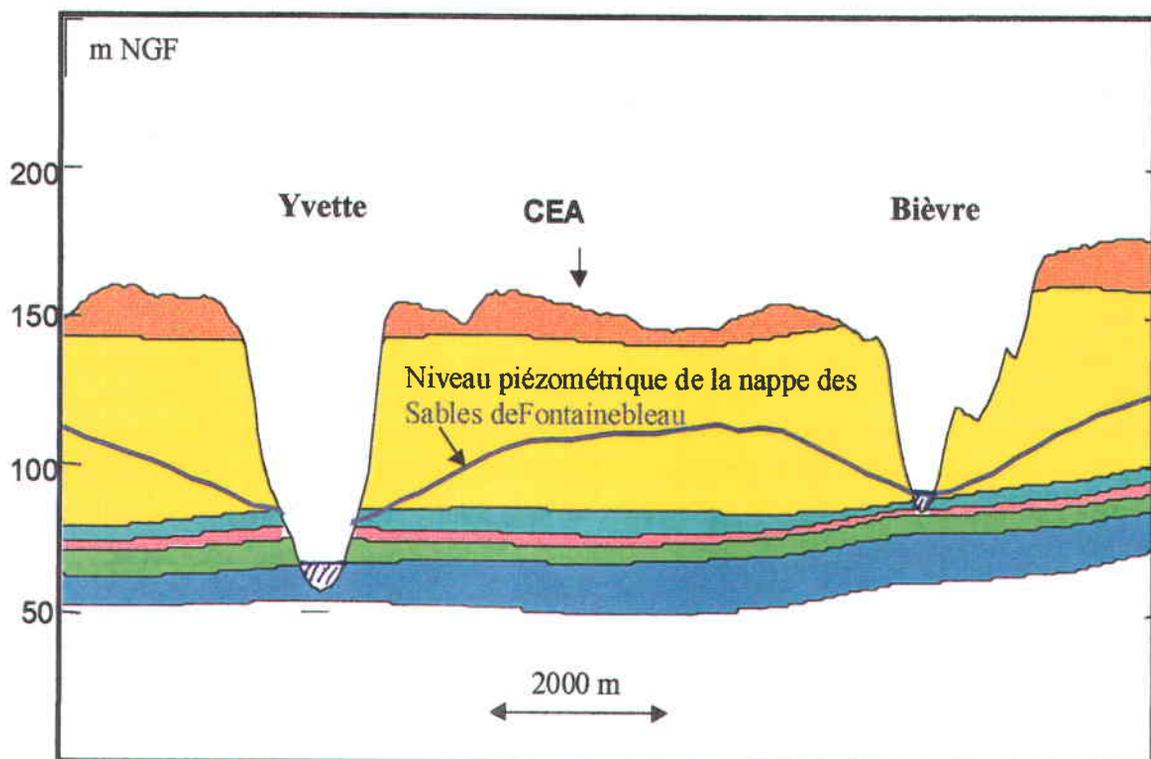


Figure 27. Profil piézométrique nord-sud de la nappe des Sables de Fontainebleau passant par le CEA Saclay

### 3.5.4. Vitesse d'écoulement de la nappe

Le gradient hydraulique (i) de la nappe est de 0.35 % sur le plateau. En prenant une perméabilité moyenne (K) de  $10^{-5}$  m/s et une porosité cinématique ( $\omega_c$ ) de 15%, la vitesse moyenne d'écoulement (u) sera de 7 m par an.

$$u = \frac{K i}{\omega_c}$$

Au niveau du CEA Saclay, l'écoulement principal est orienté vers le sud-ouest, le sud et le sud-est. Le gradient hydraulique est beaucoup plus marqué que sur le plateau ; il est de l'ordre de 1.75 %. Avec les mêmes valeurs de perméabilité et de porosité cinématique, on obtient une vitesse moyenne d'écoulement de 40 m par an. Le temps de transfert d'une molécule d'eau entre le CEA et une source située dans la vallée de la Mérentaise à 2 km sera alors d'environ 50 ans.

### 3.6. ALIMENTATION DE LA NAPPE DES SABLES DE FONTAINEBLEAU

Il ressort de l'examen de la carte piézométrique que sur le plateau de Saclay, l'écoulement de la nappe est parfaitement limité au nord par la Bièvre, à l'est par la butte de Champlan, au sud par l'Yvette et au sud-ouest par la Mérentaise.

Au nord-ouest de la zone d'étude, on observe un apport d'eau de la nappe des Sables de Fontainebleau mais cet apport est limité du fait de l'influence conjointe de la Bièvre et de la Mérentaise sur l'écoulement.

Pour le reste, l'alimentation de la nappe des Sables de Fontainebleau se fait soit de manière directe par infiltration de la pluie efficace dans les zones d'affleurement des sables, soit de manière indirecte par infiltration des eaux superficielles à travers les Argiles à Meulière. Le bilan global des eaux souterraines sur le plateau de Saclay établi par le BURGEAP fait apparaître que ces parts respectives sont à peu près égales (52% pour l'alimentation au travers des argiles et 40% pour l'alimentation directe des sables) [1].

Il existe également deux sources d'alimentation locales de la nappe (Figure 28):

- les étangs de Saclay situés dans une zone d'amincissement des Argiles à Meulière
- au droit du bâtiment 114 du CEA Saclay, la présence de puits filtrants favorise l'infiltration des eaux de surface vers la nappe.

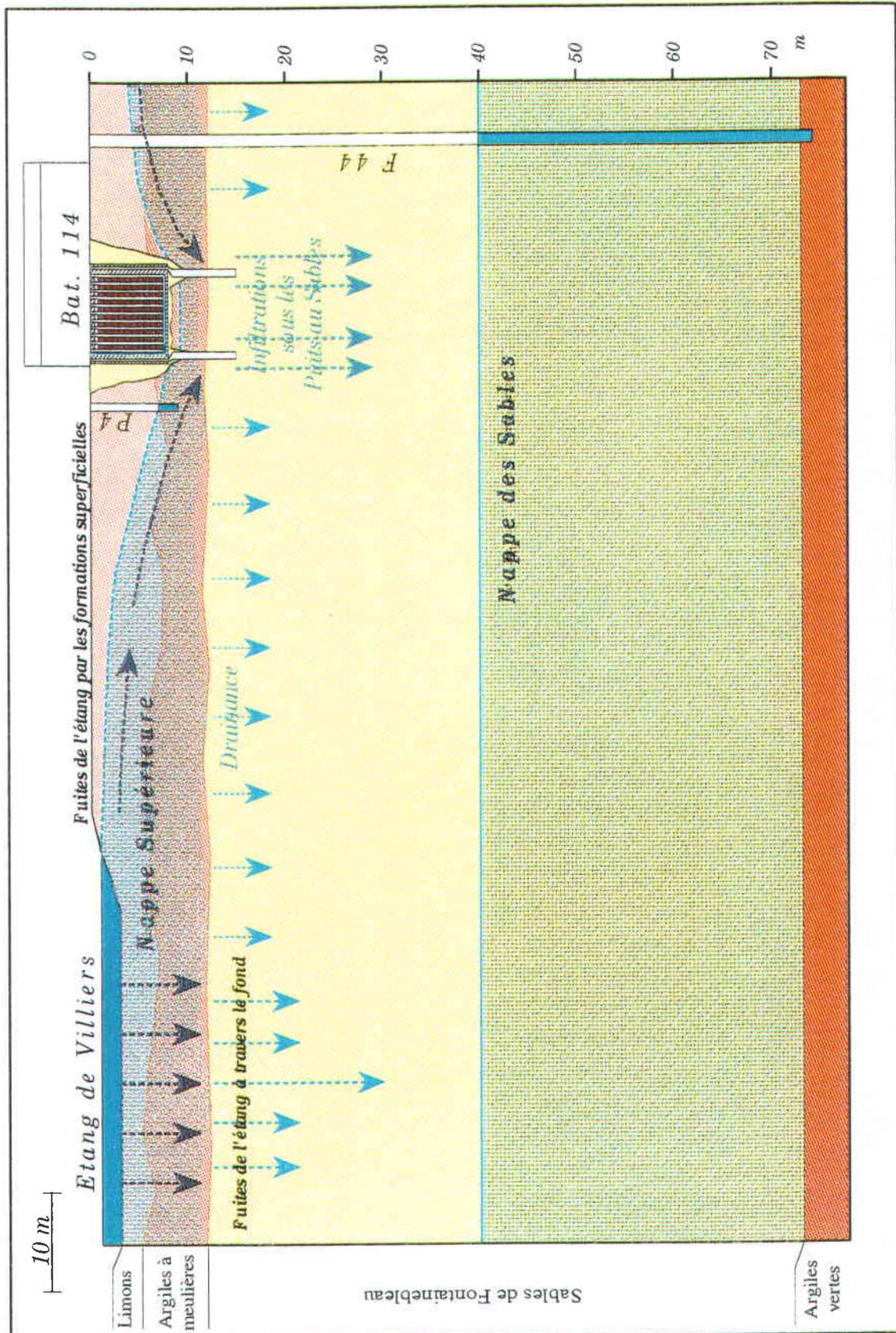


Figure 28. Contexte hydrogéologique dans le secteur du CEA Saclay (extrait de [3])

## 4. Migration de radionucléides dans la nappe des sables de Fontainebleau

### 4.1. TRAVAUX REALISES

#### 4.1.1. Mesures de radioactivité dans la nappe des Sables de Fontainebleau

Le CEA a commencé à suivre le Tritium en 1979 dans la nappe des Sables de Fontainebleau avec le forage F1 situé à l'intérieur du CEPr et dans les étangs de Saclay avec des prélèvements dans l'étang vieux (EV) et dans l'étang neuf (EN).

La mise en place du réseau de suivi de la nappe des Sables de Fontainebleau s'est poursuivi en 1980 avec de points de prélèvements (F41, F42, F43, F44 et F45) situés à l'intérieur du site du CEA Saclay à proximité des sources d'émission radioactive (Figure 1).

Quatre nouveaux points de suivi (F15, F19, F26 et F22) ont été mis en place en 1991 au sud du CEA dans une zone d'exutoire de la nappe, là où les radioéléments sont susceptibles de migrer selon le sens d'écoulement de la nappe (cf. étude hydrogéologique). Enfin trois points (F2, F24 et F27) ont été intégrés au réseau en 1995-96. Le point F24 se situe au niveau d'une source, alimentant un petit affluent de la Mérantaise. Cette source, exutoire de la nappe des Sables de Fontainebleau, est située à 1.5 km à l'ouest du CEA.

La répartition géographique des points du réseau de surveillance apparaît adaptée à l'écoulement actuel de la nappe et couvre bien la zone de migration potentielle de radionucléides en provenance du CEA Saclay. Signalons néanmoins que des prélèvements importants dans la nappe au nord du CEA Saclay pourraient modifier le sens des écoulements et déplacer la ligne de partage des eaux souterraines vers le sud.

Les résultats de ce suivi ont été synthétisés avec les valeurs minimum et maximum observés (Tableau 2). Les graphiques de suivi pour chacun des points ont été regroupés en annexe (Annexe 3).

Pour les points situés sur le site du CEA et suivi depuis 20 ans, on observe les valeurs les plus fortes en 1982 en raison d'une fuite dans le circuit d'eau lourde tritiée sous le bâtiment 609 à proximité du forage F41. On observe depuis une nette tendance à la baisse et une stabilisation de l'activité volumique en tritium avec des valeurs comprises entre 50 et 200 Bq/l selon les forages. On observe également que la période de décroissance de l'activité volumique en tritium est variable selon les forages. Ceci peut s'expliquer par la position des forages par rapport à la source radioactive.

Les points situés au sud du CEA (à environ 2 km) ont des activités volumiques en tritium beaucoup plus faibles mais avec des différences selon les points :

- Les points F15, F19 et F22 ont une activité volumique en tritium systématiquement inférieure à 20 Bq/l (à l'exception d'une valeur à 26 Bq/l pour le F19 en juillet 1991)
- Le point F26 a une activité volumique en tritium toujours comprise entre 20 et 50 Bq/l

Enfin le point F24 situé à 1.5 km à l'est du centre et le point F27 situé à 3 km au sud-est ont une activité volumique en eau lourde tritiée (HTO) systématiquement inférieure à 22 Bq/l, tandis que le point F2 situé à 3 km au nord-est a une activité volumique HTO systématiquement inférieure à 12 Bq/l.

Par ailleurs des rejets en provenance du CEA Saclay atteignent l'étang vieux par l'aqueduc des Mineurs. On retrouve dans l'eau des étangs (EV et EN) le pic de 1982. A notre connaissance, il n'existe pas d'étude sur les possibilités de migration du tritium depuis le fond des étangs vers la nappe des Sables de Fontainebleau. Le forage F1 situé à l'intérieur du CEPr, à proximité de l'étang neuf, montre des activités en tritium de l'ordre de 100 Bq/l avec un léger pic à 200 Bq/l en 1982. Cette activité en tritium provient, soit des rejets du CEPr, soit des étangs de Saclay par infiltration dans la nappe. Ce point devra être approfondi. Dans ce secteur, la nappe des Sables de Fontainebleau s'écoule vers le nord-est et, soit se déverse au niveau de sources, soit rejoint la nappe alluviale de la Bièvre. La nappe est donc susceptible de transporter des radioéléments jusqu'à la Bièvre et il faudrait prévoir un point de suivi complémentaire dans le secteur du val d'Albian.

|                  |                   | site du CEA Saclay           |                  |           |                              |           |           |           |
|------------------|-------------------|------------------------------|------------------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                  |                   | F41                          | F42              | F43       | F44                          | F45       | F46       | F47       |
| Période de suivi |                   | 1980-1998                    | 1980-1998        | 1980-1998 | 1980-1998                    | 1980-1998 | 1997-1998 | 1997-1998 |
| Tritium          | Bq/l              | 100 - 1800                   | 50 - 800         | 50 - 250  | 200 - 1400                   | 50 - 200  | 75 - 150  | 50 - 75   |
| K40              | Bq/m <sup>3</sup> |                              |                  |           |                              |           | 20 - 35   | 30 - 60   |
| alpha            | Bq/m <sup>3</sup> |                              |                  |           |                              |           | < 90      | < 90      |
| bêta             | Bq/m <sup>3</sup> |                              |                  |           |                              |           | < 110     | < 110     |
|                  |                   | CEPr                         | Etangs de Saclay |           | Secteur au sud du CEA Saclay |           |           |           |
|                  |                   | F1                           | EV               | EN        | F15                          | F19       | F26       | F22       |
| Période de suivi |                   | 1979-1997                    | 1979-1997        | 1979-1997 | 1991-1997                    | 1991-1997 | 1991-1997 | 1991-1997 |
| Tritium          | Bq/l              | 100 - 200                    | 50 - 720         | 50 - 480  | < 20                         | < 26      | 20 - 50   | < 20      |
|                  |                   | secteur à l'est et à l'ouest |                  |           |                              |           |           |           |
|                  |                   | F2                           | F24              | F27       |                              |           |           |           |
| Période de suivi |                   | 1995-1998                    | 1996-1998        | 1995-1998 |                              |           |           |           |
| HTO              | Bq/l              | < 12                         | 11 - 22          | 10 - 19   |                              |           |           |           |

**Tableau 2. Synthèse du suivi radioactif effectué par le CEA dans la nappe des Sables de Fontainebleau et dans les étangs de Saclay.**

Les valeurs séparées par un tiret correspondent aux valeurs minimum et maximum sur la période de suivi

Ces chiffres peuvent être comparés à des données de référence telles que l'activité des eaux naturelles en tritium et les normes de potabilité pour l'eau de boisson.

Actuellement les activités des eaux naturelles en tritium, sont souvent exprimées en Unités Tritium (UT). Elles vont de 5 à 25 UT en fonction des saisons et de leur situation géographique. Avec l'équivalence  $1 \text{ UT} = 0,118 \text{ Bq/l}$ , les valeurs correspondantes seraient donc de 0,6 à 2,8 Bq/l.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, une eau dont la radioactivité est inférieure à 1 Bq/l peut être considérée comme bonne pour la consommation. Mais dans le cas du tritium, et compte tenu de la faible énergie du rayonnement de ce radionucléide, la dose maximale recommandée pour l'eau de boisson, soit 0,1 millisievert/an, correspondrait à 7 800 Bq/l.

Enfin l'objectif retenu dans la directive européenne du 3 novembre 1998 est de 100 Bq/l pour le tritium.

#### **4.1.2. Modélisations du transport de radionucléides**

##### **4.1.2.1 Objectifs d'une modélisation de transport d'éléments chimiques dans un aquifère**

Face à un problème aussi complexe que la migration d'éléments dissous dans une nappe souterraine, une modélisation numérique des phénomènes en jeu doit permettre de répondre aux questions suivantes:

- 1) localiser les exutoires vers lesquels les éléments chimiques se dirigeront ;
- 2) déterminer le temps au bout duquel ces exutoires seront atteints, en particulier:
  - le temps de première arrivée des éléments (en concentration significative),
  - le temps d'arrivée du pic de concentration ;
- 3) déterminer les niveaux de concentrations atteints à ces exutoires ;
- 4) délimiter la zone affectée ;
- 5) éventuellement déterminer la quantité d'éléments infiltrés dans la nappe si cette quantité n'est pas connue.

##### **4.1.2.2 Etudes réalisées**

Deux modélisations ont été réalisées sur le problème du transport de radionucléides dans la nappe des Sables de Fontainebleau sous le plateau de Saclay.

Les rapports rendant compte de ces études et transmis au BRGM par le CEA sont les suivants:

- Modélisation du transport dans la nappe des sables en aval de l'INB72 - Evaluation majorante du flux d'activité relâché par l'entreposage du bâtiment 114  
*Rapport CEA DAM/CE/MES/LDG n°236/95 Février 1995*
- Etude hydrogéologique du site de Saclay  
*Rapport BURGEAP R 1737/A 3742/295099 Novembre 1995*

Cette étude a été réalisée à la demande de la Section de Radioprotection du Site et de l'Environnement. Direction du CEA Saclay

Dans ces deux rapports, les objectifs assignés aux modélisations sont clairement définis :

Rapport CEA (p. 1) :

*" L'objectif de l'étude réalisée est de fournir une évaluation majorante du flux d'activité potentiellement relâché par le stockage du bâtiment 114 dans son mode de fonctionnement actuel et d'estimer les caractéristiques du transport de radionucléides dans la nappe des sables entre l'aplomb du bâtiment 114 et les exutoires."*

Rapport BURGEAP (introduction) :

*"...réalisation d'une étude hydrogéologique dans l'objectif de simuler sur modèle mathématique l'impact des installations du centre sur la qualité des eaux souterraines et de mieux approcher les temps de transfert dans les nappes souterraines."*

## 4.2. RAPPELS SUR LA PROPAGATION D'ELEMENTS DANS UNE NAPPE

Afin de faciliter la compréhension de l'analyse des deux études citées ci-dessus, le présent chapitre rappelle les définitions des concepts utilisés dans le domaine du transport de masse et présente très simplement quelques lois sous tendant la modélisation des phénomènes de transport.

### 4.2.1. Principaux mécanismes

La propagation d'éléments dissous dans une nappe est sous la dépendance des principaux mécanismes suivants:

- 1) La **convection**, qui est l'entraînement de l'élément à la vitesse moyenne de l'eau.
- 2) La **dispersion**, qui provoque l'étalement du nuage de pollution sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu.
- 3) les **échanges avec la phase solide et la phase eau immobile**. Ces échanges induisent un retard à l'avancement du polluant et atténuent les teneurs. La vitesse de ces échanges est réglée par une cinétique.  
Dans certains cas, lorsqu'il y a adsorption des éléments sur la matrice solide, il est possible de rendre compte du retard à l'avancement par l'intermédiaire d'un simple coefficient appelé facteur de retard (cf. § 4.2.4.) .
- 4) Et pour les radionucléides, la **décroissance radioactive**, qui provoque une diminution de la concentration durant le trajet.

### 4.2.2. Convection et temps de parcours

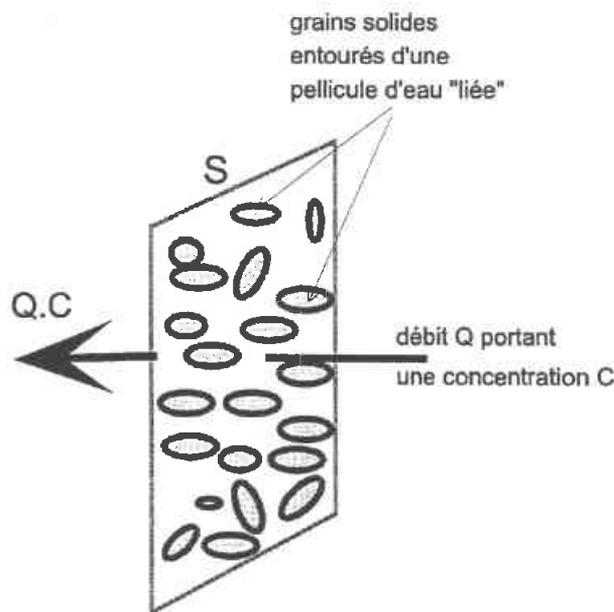
Un flux d'eau  $Q$  (en  $m^3/s$ ) passant au travers d'une section  $S$  de milieu poreux véhicule une concentration  $C$  (en  $kg/m^3$ ). Par définition, le flux de masse par convection au travers de la section  $S$  est le produit du débit  $Q$  par la concentration  $C$  (Figure 29) :

$$\Phi_{\text{conv}} = Q.C \text{ [kg/s]}$$

• **Porosité cinématique**

La section réelle  $S_r$  au travers de laquelle le flux d'éléments dissous passe est inférieure à la section géométrique  $S$  car il faut tenir compte de l'existence des grains solides et d'une fraction d'eau dite "immobile" qui ne participe pas à l'écoulement. On définit donc une porosité dite cinématique qui correspond à la fraction d'eau mobile dans le milieu poreux et qui est bien sûr inférieure à la porosité totale ; c'est le rapport de la

section réelle d'écoulement à la section totale :  $\omega_c = \frac{S_r}{S}$



FLUX DE CONVECTION  
(en kg /unité de temps)

$$\Phi_c = Q.C = (\omega_c.S)u.C$$

- Q est le flux d'eau traversant la section S (en m<sup>3</sup>/unité de temps)
- C est la concentration (en kg/m<sup>3</sup>)
- $\omega_c$  est la porosité cinématique
- u est la vitesse de l'eau (en m/s)

**Figure 29. Flux de masse par convection au travers d'une section S de milieu poreux.**

• **Vitesse réelle**

La section réellement offerte au passage de l'eau est donc :  $S_r = \omega_c.S$  et la vitesse de l'eau dans cette section S, appelée vitesse réelle, est alors :  $u = \frac{Q}{\omega_c.S}$

• **Flux de convection**

Le flux de convection est alors :  $\Phi_{\text{conv}} = Q.C = (\omega_c.S)u.C$

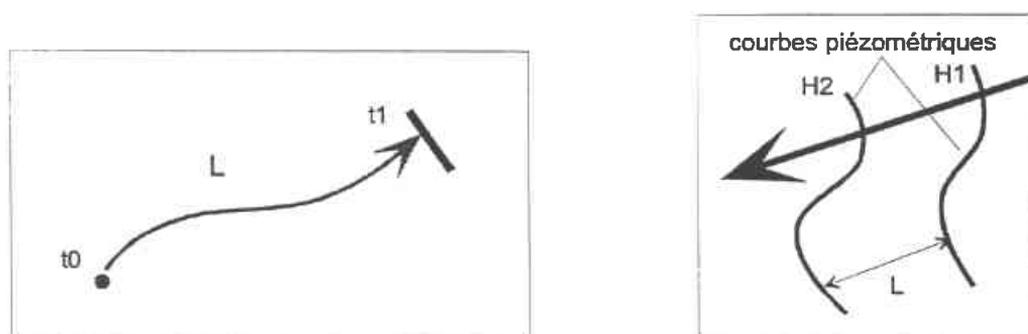
• **Temps de parcours par convection pure**

C'est le temps  $t'$  mis par un élément chimique véhiculé à la vitesse  $u$  définie ci-dessus pour parcourir une distance  $L$  dans un milieu poreux (Figure 30).

La loi fondamentale de l'hydrodynamique souterraine (loi de Darcy) permet de relier la vitesse réelle d'écoulement  $u$  (en tenant compte de la porosité cinématique  $\omega_c$ ) à la perméabilité  $K$  du milieu poreux et au gradient piézométrique  $J = (H_1 - H_2)/L$

$$u = \frac{K.J}{\omega_c}$$

Dans une nappe, le gradient piézométrique varie en général dans une gamme allant de 0.1 % à 2%.



**Figure 30. Transport d'un élément par convection**

Le temps de parcours peut donc s'exprimer comme suit :

$$t_p = t_1 - t_0 = \frac{L}{u} \quad \text{et} \quad u = \frac{K.J}{\omega_c} \quad \text{d'où :} \quad \boxed{t_p = \omega_c \frac{L}{K.J}}$$

**Le temps de parcours est donc directement proportionnel à la porosité cinématique** : plus celle-ci sera petite, plus le temps de parcours sera bref et inversement.

De faibles incertitudes sur les paramètres, jouant toutes en sens défavorable en terme de sécurité, par exemple un facteur 2 sur la perméabilité (en augmentation), un facteur 1.5 sur le gradient (en augmentation) et sur la porosité (diminution) peut donc induire une différence d'estimation appréciable sur les vitesses. Dans le tableau ci-dessous (Tableau

3), on passe ainsi de 40 m/an à 190 m/an, soit près de 5 fois plus (d'où des temps de parcours divisés par 5).

| Perméabilité K<br>(m/s) | Gradient J<br>(%) | Porosité cinématique<br>(%) | Vitesse réelle<br>(m/an) |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| $2 \cdot 10^{-3}$ m/s   | 1.5               | 10                          | <b>95 m/an</b>           |
| $2 \cdot 10^{-3}$ m/s   | 1                 | 15                          | <b>42 m/an</b>           |
| $4 \cdot 10^{-3}$ m/s   | 1.5               | 10                          | <b>190 m/an</b>          |

**Tableau 3. Influence des paramètres hydrodynamiques sur la vitesse de convection**

### 4.2.3. Dispersion

La dispersion est liée à l'hétérogénéité du milieu poreux à petite et grande échelle ; elle est à l'origine de "l'étalement" d'un panache de pollution et contribue à diluer les concentrations.

De même qu'il existe un flux de convection, il existe aussi un flux de dispersion. Celui-ci est proportionnel au gradient de la concentration C (loi de Fick). Au travers d'une section S, on a, en faisant intervenir la porosité cinématique:

$$\Phi_{DISP} = -\omega_c \cdot S \cdot D \frac{dC}{dx} \quad [kg/s]$$

D est le coefficient de dispersion ( $m^2/s$ ). Il existe un coefficient de dispersion longitudinale (suivant le sens de l'écoulement) et un coefficient de dispersion transversale. Les coefficients de dispersion sont proportionnels à la vitesse effective u de l'eau :

$$D_L = \alpha_L \cdot u$$

$$D_T = \alpha_T \cdot u$$

$\alpha_L$  et  $\alpha_T$  sont les dispersivités longitudinale et transversale, exprimées en m. Pour une nappe, les valeurs de  $\alpha_L$  sont de l'ordre du m à la centaine de m et plus (il existe un effet d'échelle lié aux hétérogénéités du milieu).

On considère en général que dans le plan horizontal  $\alpha_T$  est égal à  $\alpha_L/10$  et que suivant la verticale  $\alpha_T$  est de l'ordre de  $\alpha_L/100$ .

### 4.2.4. Adsorption

#### 4.2.4.1 Définition

Dans un aquifère certains éléments (ou composés) migrent, en première approximation, à la même vitesse que l'eau, tandis que d'autres migrent plus lentement, voire même très lentement. Le tritium appartient à la première catégorie, le plutonium et le césium à la seconde.

L'affinité d'un élément en solution pour la matrice solide peut être représentée par un coefficient de sorption nommé  $K_d$ .

Ce coefficient  $K_d$  correspond à l'hypothèse selon laquelle pour un élément donné, à tout instant la concentration dans l'eau est proportionnelle à la quantité sorbée sur la matrice de l'aquifère ; le coefficient de proportionnalité est précisément  $K_d$ , et on suppose en plus qu'il ne varie pas dans le temps. Dans ces conditions, les équations de transport se trouvent très simplifiées.

Généralement, on combine ensuite simplement la valeur de  $K_d$  avec celle du rapport solides/vides de l'aquifère (ce qui implique la porosité du milieu ainsi que, pour des raisons d'unités, la densité ou la masse spécifique de la matrice solide). On obtient alors un nouveau coefficient  $R$  appelé coefficient de retard. L'emploi de ce nouveau coefficient permet de décrire de façon très simple la migration d'un élément sorbant (qui tend à se fixer sur la matrice solide de l'aquifère) : par rapport à un élément n'ayant pas d'affinité pour cette matrice solide, comme l'hydrogène ou le tritium contenus dans l'eau, tout se passe comme si la migration de cet élément sorbant était retardée d'un facteur  $R$ . Par exemple si  $R = 10$ , la vitesse de migration de l'élément en solution, sera 10 fois plus lente que celle de l'eau du réservoir géologique. Dans le cas du tritium, qui nous intéresse ici, le  $K_d$  est nul et le coefficient de retard est égal à 1 (le tritium migre à la vitesse de l'eau).

#### **4.2.4.2 Caractéristiques des valeurs des coefficients $K_d$**

Dans la définition du coefficient de retard, le coefficient  $K_d$  intervient comme l'inverse d'une densité, ou plutôt d'une masse spécifique. Cette dernière s'exprimant par exemple en  $g/cm^3$ , le  $K_d$  s'exprimera donc logiquement en  $cm^3/g$  ; les déterminations les plus fréquentes étant faites en laboratoire, des unités comme les litres ou les millilitres peuvent être employées, d'où des valeurs de  $K_d$  en  $ml/g$  ( $1\ cm^3 = 1\ ml$ ).

#### **4.2.4.3 Facteurs influençant les valeurs de $K_d$**

Les coefficients  $K_d$  s'avèrent dépendants de très nombreux paramètres : élément (ou plutôt ion) considéré, nature minéralogique de la matrice de l'aquifère, composition de l'eau (abondance des éléments dissous), et surtout pH, voire du potentiel d'oxydo-réduction pour certains éléments. Ils sont souvent déterminés expérimentalement en laboratoire, mais la transposition des résultats à une autre échelle, celle d'une nappe aquifère entière, ne s'avère pas toujours probante. Quoiqu'il en soit, les valeurs des coefficients de sorption  $K_d$  pour différents types de roches (granites, argiles, sables...), et donc les coefficients de retard correspondants, ont été déterminées depuis longtemps.

#### **4.2.4.4 $K_d$ du tritium, du plutonium et des isotopes radioactifs du césium**

Comme on vient de le dire, le  $K_d$  du tritium est supposé nul par définition, puisque l'on suppose que l'eau tritiée HTO (T symbole du tritium) n'est pas plus attirée vers la matrice solide, que l'eau  $H_2O$ . Le ratio eau sorbée / eau en solution (si l'on peut dire) est donc nul.

Pour le césium et le plutonium, les valeurs du  $K_d$  sont rarement mesurées dans des sables, surtout dans des sables purs comme ceux qui constituent le soubassement du plateau de Saclay. Le motif est simple : la détermination de coefficients de sorption (ou de rétention) a été faite le plus souvent pour des questions de pollutions d'origine atmosphérique, ou de sécurité de stockages radioactifs. Dans le premier cas le milieu considéré a été celui des sols, dont la composition s'écarte assez sensiblement de celles de sables (notamment, à cause de la présence de matières organiques) ; dans le second, les milieux géologiques considérés comme favorables au stockage nucléaire, à savoir argiles, tufs volcaniques ou granites.

Cependant la bibliographie a livré quelques chiffres pour des sables : les valeurs sont très dispersées, puisque pour le césium, elles vont de 0,08 à 5287 ; la médiane étant vers 60. Il en va de même pour le plutonium, avec des valeurs s'étalant de 102 à 5628, la médiane étant vers 200.

#### **4.2.4.5 Valeurs de $K_d$ utilisées dans les modélisations.**

Les  $K_d$  retenus dans la modélisation du CEA, sont respectivement de 6 pour le césium, et 100 pour le plutonium. Par comparaison avec les valeurs qui viennent d'être citées, elles se situent vers le bas ou même à la limite de celles signalées dans la littérature. En d'autres termes, elles ont tendance à surestimer la vitesse de propagation de ces deux radioéléments, toujours dans l'hypothèse d'un transport en solution vraie.

### **4.3. ANALYSE CRITIQUE DES MODELISATIONS**

Préalablement à la mise en œuvre d'un modèle de transport de masse, il faut construire un modèle des écoulements souterrains (le modèle hydrodynamique). Celui-ci en effet fournit au modèle de transport le champ de vitesses (déduit de la piézométrie calculée) nécessaire aux calculs des flux de masse (convection et dispersion) et des temps de parcours.

#### **4.3.1. Modélisation hydrodynamique**

Les modèles hydrodynamiques construits par le BURGEAP et le CEA sont tous deux des modèles monocouche, simulant les écoulements souterrains dans la seule couche des Sables de Fontainebleau. Le régime hydraulique est permanent.

Au plan hydrodynamique, le choix d'une seule couche apparaît justifié dans la mesure où l'on ne dispose pratiquement pas d'information sur la couche d'argile à meulière (continuité spatiale et caractéristiques).

La stabilité dans le temps de la nappe des Sables (qui fluctue assez peu) autorise également le choix d'un régime hydraulique permanent basé sur une piézométrie moyenne.

Les caractéristiques des modèles construits sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 4) :

|                     | ETUDE BURGEAP   | ETUDE CEA  |
|---------------------|---|--|
| Géométrie           | Monocouche (2D plan)  | Monocouche (2D plan)   |
| Régime hydraulique  | Permanent   | Permanent  |
| Schéma de calcul    | Différences finies  | Eléments finis   |
| Maillage            | Gigogne : 3 maillages emboîtés<br>400m × 400m, 100m × 100m,<br>et 25 m × 25 m | 3 maillages successivement<br>utilisés : régional, sectoriel,<br>local (120 m, 40m, 20m) |
| Superficie couverte | 13 km × 8 km  | 12 km × 7 km   |
| Code de calcul      | MOSAIC (BURGEAP)  | METIS (CIG, Ecole des<br>Mines de Paris)   |

**Tableau 4. Caractéristiques des modèles hydrodynamiques**

#### *Etude BURGEAP*

La démarche de modélisation conduite par le BURGEAP est classique . Les limites choisies correspondent aux limites du système hydrogéologique tel qu'il a été circonscrit dans le chapitre hydrogéologie de ce rapport (§ 3) :

- Charge imposée sur les cours d'eau (Bièvre au nord, Mérantaise au Sud et au Sud - Ouest)
- Flux nul au nord ouest (ligne de courant) et à l'est.

Un bilan hydrique détaillé a été réalisé et conduit à définir une pluie efficace moyenne de 157 mm/an. Cette pluie efficace a été affectée comme flux d'eau entrant dans les mailles du modèle correspondant aux affleurements des sables.

En dehors des affleurements, la recharge de la nappe au travers de la couche d'Argile à meulière a été estimée par calage du modèle.

Ce calage a été réalisé sur une piézométrie moyenne calculée à partir des mesures faites sur les piézomètres du centre de Saclay.

Le calage obtenu par le BURGEAP conduit à un champ de perméabilités dont les valeurs sont comprises entre  $1.3 \cdot 10^{-5}$  m/s et  $2.8 \cdot 10^{-5}$  m/s (résultats cohérents avec les valeurs obtenues par interprétation des pompages d'essai).

#### *Etude CEA*

Le modèle hydrodynamique construit par le CEA est plus simple que celui du BURGEAP mais les valeurs obtenues après calage diffèrent peu de celles du BURGEAP en perméabilité et recharge (Tableau 5) :

- une valeur de perméabilité homogène sur tout le domaine de  $10^{-5}$  m/s a permis d'obtenir un calage sur les points de mesures qui a été jugé satisfaisant (" les

niveaux enregistrés dans les forages du CENS sont notamment recalés avec un écart inférieur au mètre", p.12 du rapport CEA).

- la recharge de la nappe est également homogène sur tout le domaine, égale à 75 mm/an

|  | ETUDE BURGEAP   | ETUDE CEA   |
|--|---|---|
| Perméabilité                                       | <b>Champ de perméabilité</b><br>$1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < K < 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ | <b>Perméabilité homogène :</b><br>$K = 10^{-5} \text{ m/s}$ |
| Recharge   |   | Recharge homogène   |
| -par les affleurements                             | <b>157 mm/an</b>  | <b>75 mm/an</b>   |
| -par percolation au travers des argiles à meulière | <b>67 mm/an</b>   |   |

**Tableau 5. Résultats des modèles hydrodynamiques**

#### 4.3.2. Modélisation du transport de radionucléides

Le modèle de transport utilise le modèle hydrodynamique qui lui fournit le champ de vitesses nécessaire aux calculs de convection et de dispersion.

##### 4.3.2.1 Scénarios simulés

Les scénarios simulés sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 6) :

| ETUDE BURGEAP  | ETUDE CEA  |
|--|--|
| Fuite de tritium sous le bâtiment 114<br>Concentration imposée: $10^5 \text{ Bq/m}^3$<br>maintenue sur la durée de la simulation<br>surface concernée : $2 \times (25 \times 25) = 1250 \text{ m}^2$ | Fuite de tritium sous le bâtiment 114<br>Flux massique imposé : $10^{10} \text{ Bq/an}$<br>1) sur 40 ans<br>2) jusqu'à stabilisation |
| Fuite d'une solution radioactive sous le réacteur OSIRIS   | Fuite de Césium et de Plutonium sous le bâtiment 114   |

**Tableau 6. Scénarios de fuite simulés**

Dans les deux études, on néglige le temps de transit vertical des radionucléides du bâtiment 114 jusqu'à la nappe, hypothèse sans doute justifiée (en tout cas au regard des temps de migration dans la nappe des Sables) et qui va d'ailleurs dans le sens sécuritaire (minoration des temps de parcours).

Par contre, la façon dont la source de contamination est simulée diffère dans les deux études :

- dans l'étude CEA, la fuite de tritium est simulée par l'intermédiaire d'un flux de masse imposé, égal à  $10^{10} \text{ Bq/an}$ .
- dans l'étude BURGEAP, c'est une concentration qui est imposée à  $10^5 \text{ Bq/m}^3$  (soit 100 Bq/l)

La valeur de  $10^{10}$  Bq/an provient d'un calage réalisé sur les concentrations mesurées au piézomètre F44 (p.20 du rapport CEA). Par ailleurs, sachant que les teneurs en tritium mesurées dans l'eau des rigoles de drainage (eau susceptible de s'infiltrer vers la nappe) est de  $10^{10}$  Bq/m<sup>3</sup>, il en a été déduit que le flux d'eau s'infiltrant vers la nappe était vraisemblablement de l'ordre de 1 m<sup>3</sup>/an.

Par contre, la valeur de  $10^5$  Bq/m<sup>3</sup> n'est pas justifiée dans le rapport BURGEAP.

Remarque:

Dans le cas de l'étude BURGEAP, la superficie concernée par la concentration imposée est de  $2 \times 625 \text{ m}^2 = 1250 \text{ m}^2$  (2 mailles). En admettant (la valeur 'étant pas fournie dans le rapport) une épaisseur d'eau effective de 10m, le volume de dilution est alors de 1250 m<sup>3</sup> et la concentration de  $10^5$  Bq/m<sup>3</sup> correspondrait alors à une masse diluée dans ce volume de  $1.25 \cdot 10^8$  Bq, soit 80 fois moins que la valeur CEA.

Cette différence dans la façon de représenter la source de radionucléides ne permettra donc pas de comparer directement les résultats des deux études relativement aux paramètres retenus pour simuler le transport (paragraphe suivant).

**4.3.2.2 Paramètres du transport dans le cas du tritium**

Ils sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tableau 7) :

|                            | ETUDE BURGEAP | ETUDE CEA |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Porosité                   | 15% + 10%     | 30%       |
| Dispersivité longitudinale | 30 m          | 70 m      |
| Dispersivité transversale  | 3 m           | 70 m      |
| Décroissance radioactive   | 12 ans        | 12 ans    |

**Tableau 7. Paramètres du transport - Cas du tritium**

• **Porosité**

Compte tenu des valeurs couramment admises pour la dispersivité cinématique en milieux poreux, de 1 à 10 %, 15 % au plus, il apparaît donc que les deux études ne suivent pas le principe de précaution pourtant énoncé dans leurs objectifs, principe qui aurait dû dicter le choix de valeurs plus faibles, conduisant à des temps de parcours plus rapides (cf. § 4.2.2.) et satisfaisant ainsi l'hypothèse sécuritaire.

La valeur de 30 % choisie par le CEA correspond plus à une valeur de porosité totale qu'à une valeur de porosité cinématique. Quant à l'étude BURGEAP, elle majore sans

explication claire la valeur de 15 % en prenant en compte une porosité supplémentaire (dite de rétention) de 10%, soit 25 % au total.

Sans que cela soit formulé dans ces études, le choix de telles valeurs revient à supposer que la fraction d'eau non mobile du milieu poreux (eau liée et eau piégée dans des pores non connectés au réseau de circulation) est "envahie" par les éléments dissous et se met en équilibre chimique avec la fraction mobile. Il en résulte donc une atténuation des concentrations (volume poreux plus important) et un retard du front convectif (porosité plus forte, donc vitesse plus faible).

Ces valeurs de porosité vont à l'encontre du principe sécuritaire (de minoration des temps de parcours).

- **Dispersivité**

Faute d'information, il est classique, dans ce type d'étude et pour l'échelle spatiale considérée, de choisir une valeur de dispersivité longitudinale de l'ordre de 50 m : c'est 30 m dans l'étude BURGEAP, 70 m dans l'étude CEA., valeurs raisonnables.

Par contre, la valeur de la dispersivité transversale est généralement prise égale (en l'absence de mesures) au dixième de la dispersivité longitudinale. Cette règle est respectée dans l'étude BURGEAP, mais pas dans l'étude CEA, où la dispersivité transversale est égale à la dispersivité longitudinale.

Un tel choix -  $\alpha_L = \alpha_T = 70$  m - induira une dilution des concentrations plus élevée que si le choix -  $\alpha_L = 30$  m et  $\alpha_T = 3$  m - avait été fait ; il ne s'inscrit donc pas dans une perspective sécuritaire (de majoration des concentrations).

#### **4.3.2.3 Résultats dans le cas du tritium**

- *Etude BURGEAP*

L'extension de la zone affectée est présentée sous la forme de cartes d'iso-concentrations à trois dates :  $t = 5$  ans,  $t = 50$  ans et  $t = 200$  ans.

Le panache simulé de radionucléides se propage longitudinalement (suivant les lignes de courant) vers la Méritaise et s'étend latéralement de façon dissymétrique : il apparaît plus étalé vers le Nord-Est que vers le Sud-Ouest. ce qui semble a priori étonnant compte tenu de la valeur relativement faible de la dispersivité transversale (3 m) et de la piézométrie calculée présentée par la carte de la figure 8 du rapport (cf. Annexe 4).

Au bout de 50 ans, la Méritaise est atteinte avec des concentrations comprises entre 100 et 1000 Bq/m<sup>3</sup> (soit 0.1 à 1 Bq/l).

L'évolution des concentrations à la source de Villiers est représentée par la figure 14 du rapport (cf. § 4.3.2.4).

• *Etude CEA*

Les résultats sont fournis :

- sous forme de cartes iso-teneurs (p. 16 du rapport) à 4 dates (t = 40 ans, t = 60 ans, t = 80 ans et t = 100 ans). Le panache de pollution diffère nettement du panache calculé dans l'étude BURGEAP ( il est en particulier plus symétrique).
- sous forme de courbe d'évolution des concentrations aux exutoires : source de Villiers et Mérantaise (p. 17 du rapport).

**4.3.2.4 Comparaison des résultats dans le cas du tritium**

Les divergences entre les deux études apparaissent clairement en comparant l'évolution des concentrations calculées à la source de Villiers. Les courbes d'évolution sont présentées par la figure 14 du rapport BURGEAP et la figure 8 (p.17) du rapport CEA.

Ces différences sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 8) :

|   | ETUDE BURGEAP                                      | ETUDE CEA   |
|---|--|---|
| Concentration à stabilisation   | <b>3800 Bq/m<sup>3</sup></b><br><b>(3.80 Bq/l)</b> | <b>100 Bq/m<sup>3</sup></b><br><b>(0.10 Bq/l)</b> |
| Temps au bout duquel les concentrations se stabilisent                          | <b>50 ans</b>                                      | <b>100 ans</b>                                    |
| Temps au bout duquel la moitié de la concentration à stabilisation est atteinte | <b>12 ans</b>                                      | <b>55 ans</b>                                     |

**Tableau 8. Evolution des concentrations calculées à la source de Villiers (F24)**

Il y a donc un **facteur 38** entre ces deux niveaux de concentration à stabilisation et le temps au bout duquel la moitié de la concentration à stabilisation est atteinte est près de **5 fois plus important** dans le cas de l'étude CEA.

**4.3.2.5 Migration du Plutonium et du Césium**

Le scénario de fuite est simulé uniquement dans l'étude CEA. Le Césium 137 et le Plutonium 239 sont deux radionucléides dont la migration sera fortement ralentie en raison de leur affinité pour la matrice solide (cf. § 4.2.4).

Cette affinité est traduite par le coefficient Kd et le ralentissement est exprimé par un facteur R dit de retard et multiplicatif de la porosité.

|               | Kd       | Facteur de retard<br>calculé | Période de<br>demi-vie |
|---------------|----------|------------------------------|------------------------|
| Césium 137    | 6 ml/g   | 30                           | 30 ans                 |
| Plutonium 239 | 100 ml/g | 500                          | 24 110 ans             |

On a vu (§ 4.2.4) que les valeurs de Kd choisies allaient largement dans le sens de la sécurité en minorant l'affinité du Césium et du Plutonium vis à vis de la matrice solide.

Les hypothèses choisies pour la simulation sont les suivantes :

- Flux d'éléments parvenant à la nappe sans rétention dans la matrice solide de la zone non saturée située entre le lieu de fuite et la nappe ;
- Flux massique constant imposé pendant 40 ans. Au-delà, on suppose une restitution progressive des éléments retenus par le terrain .

Les résultats obtenus avec les mêmes paramètres de transport que ceux utilisés pour le tritium sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 9) :

|  | Césium  | Plutonium                                |
|--|---|--|
| Source : flux de 1 m <sup>3</sup> d'eau s'échappant des rigoles de drainage chaque année | 10 <sup>6</sup> Bq/an   | 10 <sup>5</sup> Bq/an                    |
| Concentrations maximales calculées au bout de 40 ans<br>au bout de 100 ans               | < 1000 Bq/m <sup>3</sup> (1 Bq/l)<br>< 100 Bq/m <sup>3</sup> (0.1 Bq/l) | insignifiantes                           |
| Extension de la pollution  | réduite<br>exutoires non atteints                                       | très réduite<br>centrée sous le bâtiment |

**Tableau 9. Résultats des simulations de la fuite de Césium et de Plutonium**

De tels scénarios simulés sous de telles hypothèses conduisent à des concentrations calculées de Césium 137 et de Pu 239 qui **"ne peuvent entraîner qu'un marquage éventuel à très bas niveau de la nappe des sables au droit du bâtiment 114, sans migration significative"** (conclusion du rapport CEA, p.32).

#### 4.3.2.6 Résumé des choix et hypothèses

Le tableau ci-dessous (Tableau 10) résume les choix et hypothèses sous tendant les simulations réalisées et les situe par rapport à un **contexte sécuritaire** dans lequel il convient (tout en restant bien sûr réaliste) **de majorer les concentrations et de minorer les temps de parcours**.

| Hypothèses et choix  | Résultats  | Contexte        |
|--|--|-----------------|
| Temps de transfert jusqu'à la surface de la nappe négligé      | Temps de parcours minorés  | Sécuritaire     |
| Concentration imposée au lieu d'émission                       | Concentrations majorées  | Sécuritaire     |
| Dilution sur toute l'épaisseur de la nappe (modèle monocouche) | Concentrations minorées (dilution plus forte)  | Non sécuritaire |
| Equilibre des concentrations entre fraction mobile et immobile | Concentrations minorées et temps de parcours majorés   | Non sécuritaire |
| Porosité de 25 % ou 30 % (équivalent à l'hypothèse ci-dessus)  | Concentrations minorées et temps de parcours majorés   | Non sécuritaire |
| Dispersivité longitudinale = Dispersivité transversale = 70 m  | Concentrations minorées (dilution plus forte) et temps de parcours majoré (étalement plus grand) | Non sécuritaire |
| Valeur de Kd = 6 (Césium) et 100 (Plutonium)                   |  | Sécuritaire     |

**Tableau 10. Hypothèses et choix des modélisations du transport de radionucléides**

Remarquons que dans le cadre strict des écoulements, le choix d'un modèle à une seule couche de mailles suivant la verticale se justifie dans la mesure où la charge hydraulique est sans doute à peu près constante sur une verticale. Par contre, ce choix implique dans une problématique de pollution, une dilution du polluant sur toute l'épaisseur aquifère alors que le flux polluant arrivant à la nappe se disperse en fait lentement suivant la verticale.

#### 4.4. CONCLUSIONS

Au-delà des résultats obtenus qui, pour les scénarios retenus et les hypothèses faites, ne conduisent pas à une contamination significative de la nappe des Sables de Fontainebleau, il reste que la latitude de choix dans les hypothèses et les paramètres conduit à des résultats pouvant différer notablement en termes de concentration aux exutoires et de temps de parcours (cas du tritium pour les études considérées).

Même si les niveaux de concentration calculés dans ces études restent bien en deçà des normes de consommation, dans le cas de scénarios de fuite plus critiques, les écarts engendrés par des hypothèses de simulation différentes pourraient conduire à des divergences importantes d'appréciation du risque.

Il conviendrait donc dans les études ultérieures de réduire le plus possible les incertitudes et de choisir un référentiel physique (hypothèses, données et paramètres) consensuel au plan géologique, hydrogéologique et hydrodispersif :

- **Au plan géologique** : construction d'une géométrie plus précise (cotes du substratum de la nappe en particulier) et donc détermination plus précise des épaisseurs en eau.
- **Au plan hydrogéologique** : cartes et chroniques piézométriques à utiliser pour le calage en régime permanent et transitoire. Le régime transitoire non mis en œuvre dans les simulations réalisées permettrait d'affiner et de valider le calage obtenu en permanent.
- **Au plan hydrodispersif** : choix de la représentation de la source de radionucléides et choix des paramètres du transport (porosité et dispersivités). Ces derniers n'étant pas connus, il serait souhaitable comme le rapport BURGEAP l'exprime dans sa conclusion de réaliser des expériences de traçage pour en avoir une estimation.

Il conviendrait également de réaliser des analyses de sensibilité autour des valeurs de paramètres choisis de façon à obtenir des fourchettes de valeurs possibles en concentrations et temps de parcours.

Enfin, s'il semble à peu près acquis que les radionucléides infiltrés sous le bâtiment 114 se dirigent vers la Mérantaise au Sud, la prudence recommande de tester sur modèle la stabilité de la ligne de partage des eaux au niveau du dôme piézométrique face à des pompages accrus au nord de cette ligne et face à des épisodes climatiques accentués.

## Conclusion

Les données issues des forages, des études déjà réalisées et du réseau de surveillance du CEA permettent d'avoir une bonne connaissance de l'hydrogéologie du plateau de Saclay.

Ce plateau forme une entité géomorphologique bien délimitée par les vallées de la Bièvre, de la Mérantaise et de l'Yvette. Il est constitué d'une succession de couches géologiques présentant des faciès variés (argiles, marnes, sables, calcaire). La formation la plus épaisse, formée de plus de 40 m de Sables de Fontainebleau, constitue une nappe d'eau souterraine. Cette formation est isolée par deux ensembles peu perméables, l'Argile à meulière à son sommet, les Marnes à Huîtres, l'Argile verte et les Marnes supragypseuses à sa base. Les formations constituant le toit et le substratum des Sables de Fontainebleau sont présentes sur l'ensemble du plateau, mais leurs épaisseurs respectives présentent d'importantes variations.

Les données hydrodynamiques issues des essais de débit traduisent une bonne homogénéité des Sables de Fontainebleau dans ce secteur avec des perméabilités comprises entre  $7 \cdot 10^{-6}$  et  $6 \cdot 10^{-5}$  m/s. Le niveau de la nappe varie peu au cours du temps, ce qui indique une faible réaction aux épisodes pluvieux accentué par l'effet tampon de l'Argile à meulière.

L'écoulement principal de la nappe est NO-SE sur le plateau mais il est rapidement influencé par les cours d'eau. Cette influence se manifeste différemment au sud et au nord. Au nord, la nappe des Sables de Fontainebleau est en continuité hydraulique avec la nappe des alluvions de la Bièvre qui la draine. Au sud, la nappe des Sables de Fontainebleau n'est pas en liaison avec l'Yvette et se déverse au contact des marnes par une série de sources situées dans les vallées. A l'est, les Sables de Fontainebleau se rétrécissent et l'écoulement de la nappe est limité par la butte de Champlan qui provoque une inversion du sens d'écoulement.

La répartition géographique des points du réseau de surveillance du CEA apparaît adaptée à l'écoulement actuel de la nappe et couvre bien la zone de migration potentielle de radionucléides en provenance du CEA Saclay. Il faudrait néanmoins prévoir un point de suivi complémentaire dans le secteur du val d'Albian.

Les modèles de transport élaborés par le BURGEAP et le CEA ne conduisent pas à une contamination significative de la nappe des Sables de Fontainebleau, même si les hypothèses et les paramètres choisis donnent des résultats pouvant différer notablement en termes de concentration aux exutoires et de temps de parcours.

Il conviendrait dans les études ultérieures, d'une part de réduire le plus possible les incertitudes et de choisir un référentiel physique (hypothèses, données et paramètres) consensuel au plan géologique, hydrogéologique et hydrodispersif, d'autre part de

réaliser des analyses de sensibilité autour des valeurs de paramètres choisis de façon à obtenir des fourchettes de valeurs possibles en concentrations et temps de parcours.

## Glossaire

**Adsorption** : fixation de molécules ou d'ions à la surface de corps solides

**BSS** : Banque des données du Sous-Sol gérée par le BRGM

**Carottage VT (Vitesse/Temps)** : forage de faible profondeur réalisé pour le calage des profils sismiques lors des campagnes d'exploration pétrolière.

**Cénozoïque** : division des temps géologiques qui a commencé voici 65 millions d'années, regroupant l'ère tertiaire et l'ère quaternaire

**Coefficient d'emmagasinement** : volume d'eau libéré par un prisme vertical de terrain aquifère par unité de section et unité de pression (exprimée en hauteur d'eau)

**Convection** : transport d'un élément à la vitesse moyenne de l'eau

**Diagenèse** : ensemble des modifications physico-chimiques que subit une roche après la phase de dépôt. Pour les sables, on observe fréquemment des phénomènes de cimentation des grains sous l'effet de la compaction et de l'interaction eau-roche

**Dispersion** : étalement d'un nuage de polluant sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu

**Effet pariétal** : colmatage partiel de l'aquifère autour du forage par les boues de forage

**GDM** : Geological Data Management - logiciel développé par le BRGM

**Gradient hydraulique** : perte de charge par unité de longueur de l'aquifère

**Isohypse** : courbe d'égale altitude.

**Isopaque** : courbe d'égale épaisseur d'une formation

**Isopièze** : courbes d'égale hauteur piézométrique, exprimée en altitude par rapport à la mer

**Krigeage** : Outil géostatistique consistant à trouver la meilleure estimation possible d'une variable. Le krigeage prend en compte la position relative du point à estimer et des points expérimentaux ainsi que la position des points expérimentaux entre eux

**Lithologie** : Nature des roches d'une formation géologique

**Lithostratigraphie** : Stratigraphie\* basée uniquement sur les différences de nature entre les couches indépendamment de leur contenu en fossiles

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain : grille représentant la topographie du secteur d'étude ; la maille de la grille est ici de 50 m

**Mur** : terrains situés à la base d'une formation

**Nappe captive** : une nappe captive est un milieu poreux saturé en eau sur toute sa hauteur et surmontée par une formation peu perméable ; la pression de l'eau dans la nappe est supérieure à la pression atmosphérique

**Nappe libre** : une nappe libre est un milieu poreux qui n'est saturé en eau que sur une certaine hauteur (épaisseur mouillée) et est surmonté d'une zone non saturée ; la pression de l'eau dans la nappe est égale à la pression atmosphérique

**Perméabilité** : aptitude d'un terrain à laisser écouler au travers d'une section unitaire, un débit de fluide sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique

**Porosité** : rapport du volume des vides au volume total d'un milieu

**Porosité cinématique** : rapport du volume d'eau qui peut circuler au volume total de l'aquifère

**Stratigraphie** : étude de la succession des couches sédimentaires

**Toit** : terrains situés au sommet d'une formation

**Transmissivité** : produit de la perméabilité par l'épaisseur de la zone saturée

## **Bibliographie**

- [1] BURGEAP (1995) – Etude hydrogéologique du site de Saclay. Modèle MOSAIC, rapport R.1737/A.3742/295099
- [2] Laboratoire de Détection et de Géophysique, CEA (1995) – Modélisation du transport dans la nappe des sables en aval de l'INB 72, DAM/CE/MES/LDG/236/95
- [3] Laboratoire de Détection et de Géophysique, CEA (1995) - Etude hydrogéologique de l'étang de Villiers, contribution de l'étang à l'alimentation de la nappe des sables, DAM/CE/MES/LDG 1014/95/DO
- [4] Laboratoire de Détection et de Géophysique, CEA (1995) – CEN Saclay : Contrôle des caractéristiques des piézomètres de la nappe des sables, DAM/CE/MES/LDG/121/95
- [5] HYDROMINES (1998) – Rapport d'exécution de captages d'eau souterraine par forages, Les Hautes Bornes et Ville Dombe, Saclay, rapport fp 96057.
- [6] BRGM (1983) – Base aérienne 107 de Villacoublay, compte rendu et interprétation des pompages d'essai réalisés du 26 avril au 2 mai 1983, rapport BRGM 83 IDF 028

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1. Implantation des points de prélèvement du CEA dans la nappe des Sables de Fontainebleau.....          | 8  |
| Figure 2. Carte topographique issue du MNT de l'IGN.....  | 12 |
| Figure 3. Représentation en 3D de la topographie du plateau de Saclay.....                                      | 13 |
| Figure 4. Coupe lithostratigraphique du forage 02184X0001.....  | 23 |
| Figure 5. Carte des isopaques des formations de couverture.....   | 24 |
| Figure 6. Carte des isohypses du mur des formations de couverture.....  | 25 |
| Figure 7. Carte des isopaques des Sables de Fontainebleau.....  | 26 |
| Figure 8. Carte des isohypses du mur des Sables de Fontainebleau.....   | 27 |
| Figure 9. Carte des isopaques des Marnes à Huitres (s.l.).....  | 28 |
| Figure 10. Carte des isohypse du murs des Marnes à Huitres (s.l.).....  | 29 |
| Figure 11. Carte des isopaques de la formation de Brie.....   | 30 |
| Figure 12. Carte des isohypses du mur de la formation de Brie.....  | 31 |
| Figure 13. Carte des isopaques de l'Argile verte.....   | 32 |
| Figure 14. Carte des isohypses du mur de l'Argile verte.....  | 33 |
| Figure 15. Carte des isopaques des Marnes supragypseuses.....   | 34 |
| Figure 16. Carte des isohypses du mur des Marnes supragypseuses.....  | 35 |
| Figure 17. Coupe géologique est-ouest.....  | 36 |
| Figure 18. Coupe géologique sud-nord.....   | 37 |
| Figure 19. Carte des débits spécifiques.....  | 41 |
| Figure 20. Carte des transmissivités.....   | 42 |
| Figure 21. Carte des perméabilités.....   | 43 |
| Figure 22. Evolution du niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau au droit du CEA Saclay.....              | 45 |
| Figure 23. Evolution du niveau de la nappe des Sables de Fontainebleau à 20 km à l'ouest du CEA.....            | 46 |
| Figure 24. Relation entre la piézométrie de la nappe des Sables de Fontainebleau et la pluie efficace.....      | 46 |
| Figure 25. Répartition des données relatives à la piézométrie de la nappe des Sables de Fontainebleau.....      | 49 |
| Figure 26. Carte piézométrique de la nappe des Sables de Fontainebleau.....                                     | 50 |
| Figure 27. Profil piézométrique nord-sud de la nappe des Sables de Fontainebleau passant par le CEA Saclay..... | 51 |
| Figure 28. Contexte hydrogéologique dans le secteur du CEA Saclay ( <i>extrait de [3]</i> ).....                | 53 |
| Figure 29. Flux de masse par convection au travers d'une section S de milieu poreux.....                        | 58 |
| Figure 30. Transport d'un élément par convection.....   | 59 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1. Paramètres hydrodynamiques de la nappe des Sables de Fontainebleau.....                         | 40 |
| Tableau 2. Synthèse du suivi radioactif effectué par le CEA dans la nappe des Sables de Fontainebleau..... | 55 |
| Tableau 3. Influence des paramètres hydrodynamiques sur la vitesse de convection.....                      | 60 |
| Tableau 4. Caractéristiques des modèles hydrodynamiques .....  | 63 |
| Tableau 5. Résultats des modèles hydrodynamiques.....  | 64 |
| Tableau 6. Scénarios de fuite simulés.....   | 64 |
| Tableau 7. Paramètres du transport - Cas du tritium .....  | 65 |
| Tableau 8. Evolution des concentrations calculées à la source de Villiers (F24).....                       | 67 |
| Tableau 9. Résultats des simulations de la fuite de Césium et de Plutonium.....                            | 68 |
| Tableau 10. Hypothèses et choix des modélisations du transport de radionucléides .....                     | 69 |

## Liste des annexes

|   |  |
|---|--|
| Annexe 1 Données d'essais de débit.....                                 |  |
| Annexe 2 Données piézométriques.....                                    |  |
| Annexe 3 Réseau de surveillance du CEA : suivi de la radioactivité..... |  |
| Annexe 4 Résultats des simulations du BURGEAP .....                     |  |



## **Annexes**



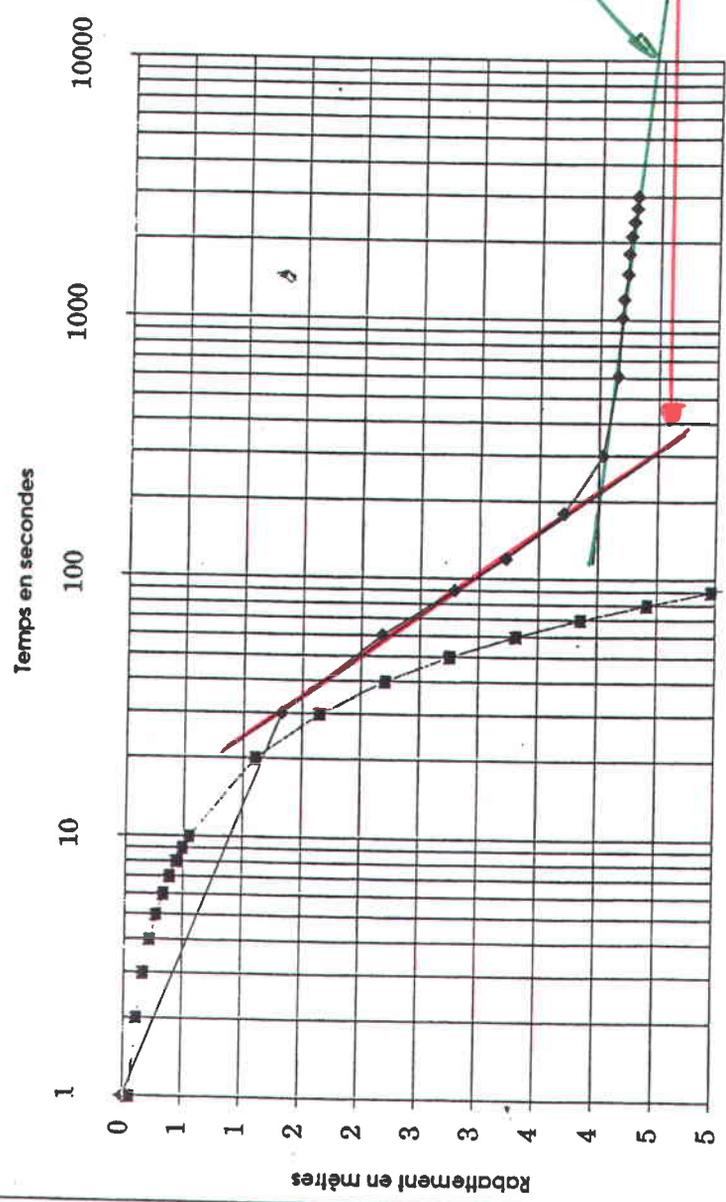
**Annexe 1**  
**données d'essais de débit**

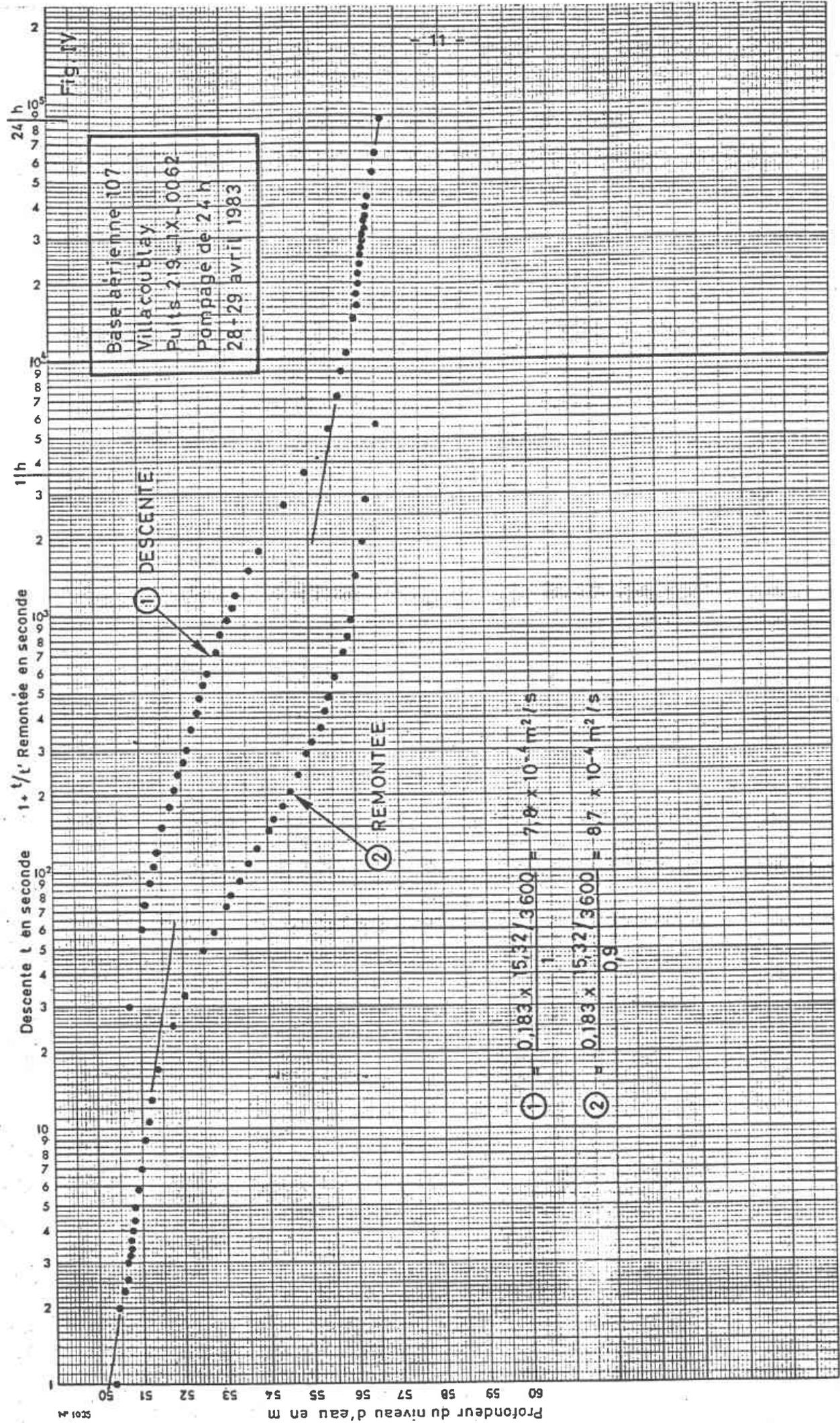


| INDR | INDICE     | DES     | X      | Y       | Z      | date essai | Q<br>(m3/h) | s<br>(m) | Qs<br>(m3/h/m) | hauteur<br>utile (m) | T<br>(m2/s) | K<br>(m/s) | origine des données          |
|------|------------|---------|--------|---------|--------|------------|-------------|----------|----------------|----------------------|-------------|------------|------------------------------|
| 1    | 02183X0008 | F2      | 579380 | 1115780 | 159.99 | 01/03/57   | 25          | 12       | 2.08           |                      |             |            | BSS                          |
| 2    | 02184X0002 |         | 584740 | 1119770 | 110.00 | 01/06/64   | 5.5         | 4.5      | 1.22           |                      |             |            | BSS                          |
| 3    | 02184X0003 |         | 581900 | 1117150 | 160.00 | 01/01/61   | 5           | 5.5      | 0.91           | 7.60                 | 4.40E-04    | 5.79E-05   | BSS                          |
| 4    | 02184X0010 | F       | 583800 | 1113460 | 110.79 | 15/01/64   | 18          | 12       | 1.50           | 5.50                 | 2.10E-04    | 3.82E-05   | BSS                          |
| 5    | 02184X0012 |         | 583540 | 1115970 | 159.00 |            | 17.3        | 9.25     | 1.87           |                      |             |            | BSS                          |
| 6    | 02184X0023 | F/AEP   | 583400 | 1116454 | 157.08 |            | 20          | 11.6     | 1.72           |                      | 5.00E-04    |            | BSS                          |
| 7    | 02184X0029 |         | 584760 | 1119740 | 115.00 | 01/01/59   | 22          | 17       | 1.29           |                      |             |            | BSS                          |
| 8    | 02184X0032 |         | 583820 | 1118030 | 160.00 | 01/01/65   | 10          | 5.3      | 1.89           |                      |             |            | BSS                          |
| 9    | 02184X0038 |         | 585660 | 1119670 | 170.00 | 01/07/67   | 30          | 33.5     | 0.90           | 18.50                | 3.00E-04    | 1.62E-05   | BSS                          |
| 10   | 02184X0040 |         | 583930 | 1118000 | 159.00 | 01/01/69   | 22          | 11       | 2.00           |                      |             |            | BSS                          |
| 11   | 02184X0061 | F1      | 586328 | 1115940 | 152.06 | 08/12/97   | 12          | 21.7     | 0.55           | 35.00                | 2.60E-04    | 7.43E-06   | Hydromines fp 96057          |
| 12   | 02191X0033 | P2/AEP  | 587400 | 1114400 | 155.08 |            | 7.2         | 5.77     | 1.25           |                      |             |            | BSS                          |
| 13   | 02191X0035 | CEA/F4  | 587920 | 1115920 | 149.87 |            | 22          | 18       | 1.22           |                      |             |            | BSS                          |
| 14   | 02191X0036 | CEA/F1  | 587760 | 1116140 | 150.90 |            | 18          | 12       | 1.50           |                      |             |            | BSS                          |
| 15   | 02191X0037 | CEA/F2  | 587710 | 1116430 | 156.02 |            | 15          | 11       | 1.36           |                      |             |            | BSS                          |
| 16   | 02191X0038 | CEA/F3  | 588160 | 1115890 | 151.89 |            | 20          | 17       | 1.18           |                      |             |            | BSS                          |
| 17   | 02191X0049 | CEA/F5  | 588040 | 1115930 | 150.86 |            | 30          | 20       | 1.50           | 22.00                | 4.50E-04    | 2.05E-05   | BSS                          |
| 18   |            | CEA/F43 | 585770 | 1114027 | 156.80 | 04/08/94   | 2.4         | 0.9      | 2.67           | 37.50                | 7.60E-04    | 2.03E-05   | CEA DAM/CE/MES/LDG/N° 121/95 |
| 19   |            | CEA/F44 | 585430 | 1113633 | 151.76 | 09/08/94   | 2.4         | 4.2      | 0.57           | 35.00                | 5.40E-04    | 1.54E-05   | CEA DAM/CE/MES/LDG/N° 121/95 |
| 20   | 02191X0062 |         | 591080 | 1119150 | 174.00 | 27/04/83   | 15.3        | 6.4      | 2.39           | 16.00                | 8.50E-04    | 5.31E-05   | BRGM 83 IDF 028              |
| 21   | 02191X0081 | F2      | 587020 | 1116440 | 153.48 | 08/12/97   | 18          | 10.4     | 1.73           | 26.60                | 4.80E-04    | 1.80E-05   | Hydromines fp 96057          |
|      |            |         |        |         |        |            |             |          |                |                      |             |            |                              |
|      |            | CEA/F43 | 585770 | 1114027 | 156.80 | 04/08/94   | 2.4         | 0.9      | 2.67           | 37.50                | 3.00E-04    | 8.00E-06   | CEA DAM/CE/MES/LDG/N° 121/95 |
|      |            | CEA/F44 | 585430 | 1113633 | 151.76 | 09/08/94   | 2.4         | 4.2      | 0.57           | 35.00                | 4.20E-05    | 1.20E-06   | CEA DAM/CE/MES/LDG/N° 121/95 |



# Essai de pompage sur le piézomètre F44 le 9/08/1994





SC01-24

**Annexe 2**  
**données piézométriques**

| INDR | indice | DESIGNATION | nature       | X      | Y       | Z_BSS  | Z_MNT  | PROF_EAU_SOL | DATE_EAU | COTE_PIEZO |
|------|--------|-------------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------------|----------|------------|
| 1    |        | ES96SRMI02  | carottage_VT | 584663 | 1116573 | 152.00 | 149.21 | 33.00        |          | 116.21     |
| 2    |        | FR62C00013  | carottage_VT | 590660 | 1108925 | 152.00 | 152.28 | 46.00        |          | 106.28     |
| 3    |        | FR62C00025  | carottage_VT | 586755 | 1108970 | 159.00 | 157.82 | 52.00        |          | 105.82     |
| 4    |        | FR62C00027  | carottage_VT | 592270 | 1109500 | 161.00 | 160.37 | 55.00        |          | 105.37     |
| 5    |        | SN82HP0047  | carottage_VT | 580800 | 1109200 | 155.00 | 153.83 | 40.00        |          | 113.83     |
| 6    |        | SN82HP0048  | carottage_VT | 582850 | 1108850 | 163.00 | 170.00 | 48.00        |          | 122.00     |
| 7    |        | SN82HP0058  | carottage_VT | 591800 | 1110050 | 153.00 | 149.84 | 52.00        |          | 97.84      |
| 8    |        | SN82HP0059  | carottage_VT | 591349 | 1109350 | 156.00 | 160.29 | 54.00        |          | 106.29     |
| 9    |        | SN82HP0060  | carottage_VT | 590800 | 1108100 | 155.00 | 154.02 | 36.00        |          | 118.02     |
| 10   |        | SN82HP0082  | carottage_VT | 585100 | 1109200 | 157.00 | 147.06 | 37.00        |          | 110.06     |
| 11   |        | SN82HP0084  | carottage_VT | 582250 | 1109900 | 158.00 | 160.14 | 55.00        |          | 105.14     |
| 12   |        | SN82HP0085  | carottage_VT | 581800 | 1109000 | 165.00 | 166.30 | 47.00        |          | 119.30     |
| 13   |        | SN82HP0094  | carottage_VT | 580750 | 1114600 | 164.00 | 161.58 | 55.00        |          | 106.58     |
| 14   |        | SN82HP0109  | carottage_VT | 579250 | 1113350 | 156.00 | 136.08 | 63.00        |          | 73.08      |
| 15   |        | SN82HP0113  | carottage_VT | 580300 | 1116450 | 163.00 | 163.55 | 43.00        |          | 120.55     |
| 16   |        | SN85ES0042  | carottage_VT | 581015 | 1111846 | 74.00  | 80.66  | 3.00         |          | 77.66      |
| 17   |        | SN85ES0083  | carottage_VT | 579681 | 1118027 | 160.00 | 160.06 | 27.00        |          | 133.06     |
| 18   |        | SN85ES0084  | carottage_VT | 579683 | 1119482 | 145.00 | 141.77 | 11.00        |          | 130.77     |
| 19   |        | SN85ES0085  | carottage_VT | 579902 | 1120587 | 162.00 | 162.39 | 27.00        |          | 135.39     |
| 20   |        | SN85ES0086  | carottage_VT | 580885 | 1120084 | 155.00 | 154.69 | 29.00        |          | 125.69     |
| 21   |        | SN85ES0095  | carottage_VT | 579422 | 1109411 | 156.00 | 155.26 | 42.00        |          | 113.26     |
| 22   |        | SN85ES0096  | carottage_VT | 580899 | 1109574 | 169.00 | 167.50 | 60.00        |          | 107.50     |
| 23   |        | SN85ES0097  | carottage_VT | 582592 | 1109791 | 159.00 | 151.62 | 54.00        |          | 97.62      |
| 24   |        | SN85ES0098  | carottage_VT | 584618 | 1109563 | 157.00 | 155.99 | 56.00        |          | 99.99      |
| 25   |        | SN85ES0101  | carottage_VT | 589027 | 1109314 | 153.00 | 152.48 | 50.00        |          | 102.48     |
| 26   |        | SN85ES0102  | carottage_VT | 590437 | 1109274 | 153.00 | 152.76 | 51.00        |          | 101.76     |
| 27   |        | SN85ES0103  | carottage_VT | 592258 | 1109238 | 161.00 | 159.51 | 59.00        |          | 100.51     |
| 28   |        | SN85ES0104  | carottage_VT | 593650 | 1109325 | 108.00 | 105.96 | 12.00        |          | 93.96      |
| 29   |        | SN86OR0040  | carottage_VT | 592689 | 1109358 | 157.00 | 156.13 | 58.00        |          | 98.13      |
| 30   |        | SN86PIF001  | carottage_VT | 591678 | 1115319 | 103.00 | 99.08  | 24.00        |          | 75.08      |
| 31   |        | SN86PIF012  | carottage_VT | 590223 | 1113412 | 151.00 | 150.99 | 44.00        |          | 106.99     |
| 32   |        | SN86PIF013  | carottage_VT | 584616 | 1114252 | 155.00 | 153.81 | 43.00        |          | 110.81     |
| 33   |        | SN86PIF014  | carottage_VT | 581820 | 1115253 | 155.00 | 155.91 | 39.00        |          | 116.91     |
| 34   |        | SN86PIF015  | carottage_VT | 585187 | 1120890 | 162.00 | 162.26 | 42.00        |          | 120.26     |
| 35   |        | SN86PIF016  | carottage_VT | 593256 | 1118016 | 168.00 | 168.42 | 57.00        |          | 111.42     |

| INDR | indice | DESIGNATION | nature       | X      | Y       | Z_BSS  | Z_MNT  | PROF_EAU_SOL | DATE_EAU | COTE_PIEZO |
|------|--------|-------------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------------|----------|------------|
| 36   |        | SN86PIF020  | carottage_VT | 592438 | 1119178 | 165.00 | 163.01 | 49.00        |          | 114.01     |
| 37   |        | SN86PIF021  | carottage_VT | 594885 | 1117665 | 115.00 | 117.17 | 15.00        |          | 102.17     |
| 38   |        | SN86PIF041  | carottage_VT | 590229 | 1115700 | 153.00 | 153.04 | 43.00        |          | 110.04     |
| 39   |        | SN86PIF049  | carottage_VT | 595310 | 1112635 | 92.00  | 101.10 | 4.00         |          | 97.10      |
| 40   |        | SN86PIF050  | carottage_VT | 589142 | 1119889 | 178.00 | 177.92 | 56.00        |          | 121.92     |
| 41   |        | SN86PIF079  | carottage_VT | 592367 | 1117116 | 155.00 | 150.45 | 58.00        |          | 92.45      |
| 42   |        | SN86PIF120  | carottage_VT | 586603 | 1120538 | 152.00 | 153.60 | 31.00        |          | 122.60     |
| 43   |        | SN86PIF124  | carottage_VT | 583900 | 1112750 | 91.00  | 97.24  | 3.00         |          | 94.24      |
| 44   |        | SN86PIF126  | carottage_VT | 582665 | 1108770 | 169.00 | 166.80 | 42.00        |          | 124.80     |
| 45   |        | SN86PIF127  | carottage_VT | 581402 | 1115477 | 111.00 | 115.36 | 3.00         |          | 112.36     |
| 46   |        | SN86PIF130  | carottage_VT | 586932 | 1114456 | 156.00 | 157.04 | 45.00        |          | 112.04     |
| 47   |        | SN86PIF135  | carottage_VT | 595760 | 1119605 | 97.00  | 97.47  | 7.00         |          | 90.47      |
| 48   |        | SN86PIF171  | carottage_VT | 582587 | 1119486 | 115.00 | 118.52 | 3.00         |          | 115.52     |
| 49   |        | SN86PIF172  | carottage_VT | 582074 | 1117250 | 157.00 | 157.45 | 30.00        |          | 127.45     |
| 50   |        | SN86PIF173  | carottage_VT | 580979 | 1114155 | 164.00 | 164.88 | 56.00        |          | 108.88     |
| 51   |        | SN87LM0029  | carottage_VT | 583502 | 1108236 | 165.00 | 165.98 | 30.00        |          | 135.98     |
| 52   |        | SN87LM0050  | carottage_VT | 579822 | 1109398 | 120.00 | 122.14 | 18.00        |          | 104.14     |
| 53   |        | SN87LM0054  | carottage_VT | 579090 | 1108160 | 165.00 | 162.28 | 46.00        |          | 116.28     |
| 54   |        | SN87LM0055  | carottage_VT | 584125 | 1110445 | 159.00 | 144.37 | 66.00        |          | 78.37      |
| 55   |        | SN87LM0057  | carottage_VT | 587556 | 1108424 | 155.00 | 156.31 | 48.00        |          | 108.31     |
| 56   |        | SN87LM0058  | carottage_VT | 580269 | 1111500 | 76.00  | 75.31  | 3.00         |          | 72.31      |
| 57   |        | SN87LM0069  | carottage_VT | 593452 | 1109905 | 92.00  | 91.13  | 5.00         |          | 86.13      |
| 58   |        | SN87LM0074  | carottage_VT | 580607 | 1117262 | 164.00 | 164.78 | 35.00        |          | 129.78     |
| 59   |        | SN89PIF010  | carottage_VT | 580723 | 1119231 | 161.00 | 159.95 | 31.00        |          | 128.95     |
| 60   |        | SN89PIF016  | carottage_VT | 583747 | 1117774 | 152.00 | 156.32 | 32.00        |          | 124.32     |
| 61   |        | SN89PIF023  | carottage_VT | 590178 | 1119894 | 177.00 | 175.93 | 52.00        |          | 123.93     |
| 62   |        | SN89PIF025  | carottage_VT | 588672 | 1115604 | 148.00 | 145.39 | 38.00        |          | 107.39     |
| 63   |        | SN89PIF026  | carottage_VT | 587438 | 1113206 | 159.00 | 157.57 | 47.00        |          | 110.57     |
| 64   |        | SN90ESS014  | carottage_VT | 579333 | 1115066 | 167.00 | 166.20 | 50.00        |          | 116.20     |
| 65   |        | SN90ESS018  | carottage_VT | 581290 | 1109072 | 159.00 | 160.65 | 43.00        |          | 117.65     |
| 66   |        | SN91PIF001  | carottage_VT | 587552 | 1118293 | 89.00  | 92.23  | 3.00         |          | 89.23      |
| 67   |        | SN91PIF002  | carottage_VT | 587836 | 1119990 | 174.00 | 171.34 | 57.00        |          | 114.34     |
| 68   |        | SN91PIF005  | carottage_VT | 593818 | 1120069 | 168.00 | 165.23 | 44.00        |          | 121.23     |
| 69   |        | SN91PIF006  | carottage_VT | 595305 | 1118504 | 108.00 | 106.44 | 11.00        |          | 95.44      |
| 70   |        | FR62C00011  | carottage_VT | 593150 | 1108200 | 129.00 | 124.81 | 25.00        |          | 99.81      |

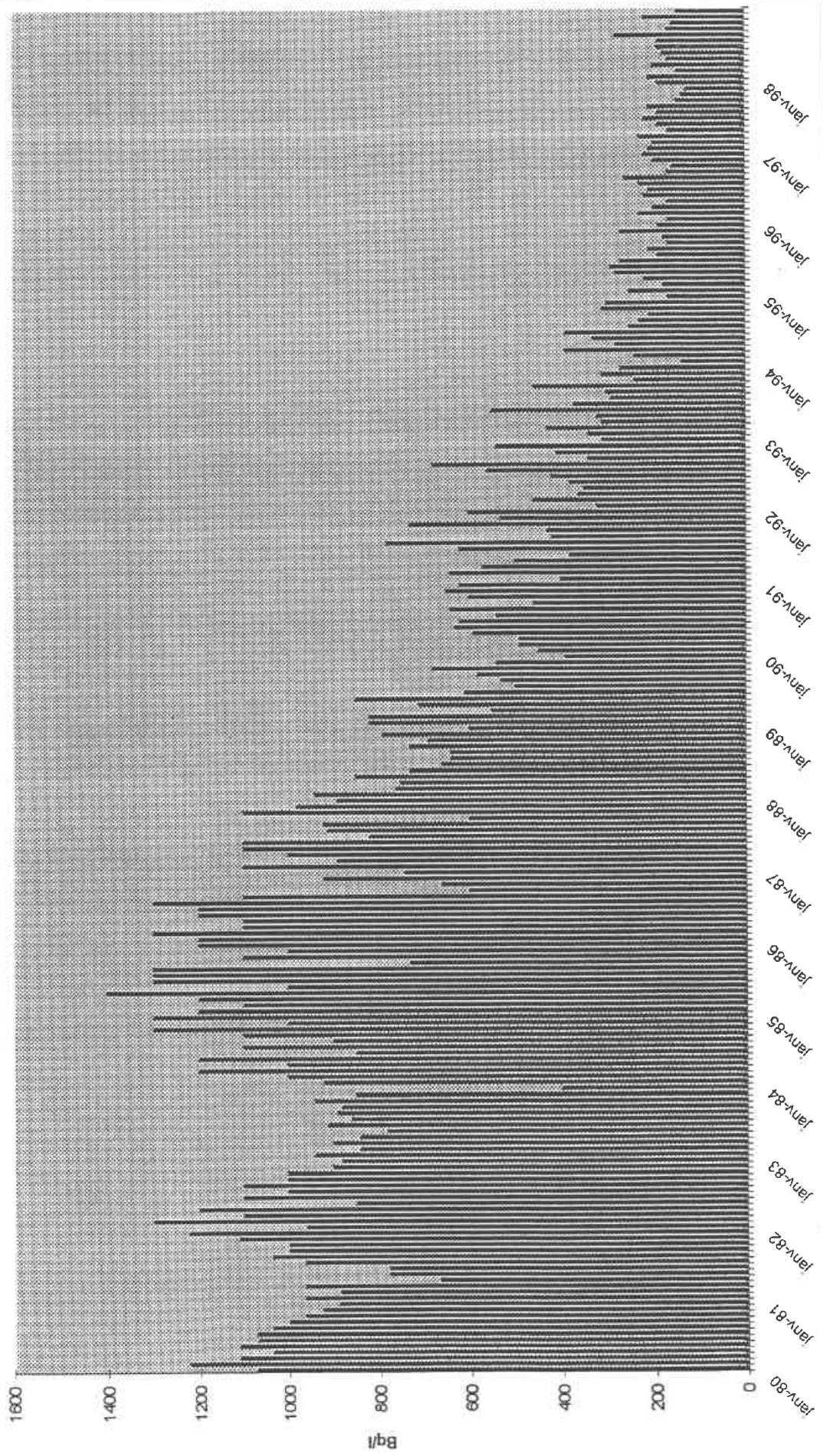
| INDR | indice     | DESIGNATION | nature       | X      | Y       | Z_BSS  | Z_MNT  | PROF_EAU_SOL | DATE_EAU  | COTE_PIEZO |
|------|------------|-------------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------------|-----------|------------|
| 71   |            | SN85ES0099  | carottage_VT | 586424 | 1109992 | 80.00  | 77.61  | 3.00         |           | 74.61      |
| 72   |            | SN86PIF011  | carottage_VT | 593538 | 1113178 | 92.00  | 95.36  | 9.00         |           | 86.36      |
| 73   |            | SN86PIF139  | carottage_VT | 595982 | 1120324 | 86.00  | 87.40  | 6.00         |           | 81.40      |
| 74   |            | SN86PIF141  | carottage_VT | 594467 | 1116245 | 92.00  | 92.42  | 3.00         |           | 89.42      |
| 75   | 02183X0008 | F2          | ouvrage      | 579380 | 1115780 | 160.50 | 159.99 | 41.50        | 05/08/61  | 118.49     |
| 76   | 02183X0024 | F           | ouvrage      | 579380 | 1116230 | 148.00 | 138.62 | 24.50        | 15/04/61  | 114.12     |
| 77   | 02183X0025 | F1          | ouvrage      | 579380 | 1115760 | 161.75 | 160.67 | 42.50        | 15/03/61  | 118.17     |
| 78   | 02184X0001 | SP          | ouvrage      | 586610 | 1114250 | 157.00 | 157.59 | 41.10        |           | 116.49     |
| 79   | 02184X0010 | F           | ouvrage      | 583800 | 1113460 | 108.00 | 110.79 | 19.00        | 15/01/64  | 91.79      |
| 80   | 02184X0013 | F           | ouvrage      | 581860 | 1112490 | 155.00 | 154.52 | 56.90        | 15/06/61  | 97.62      |
| 81   | 02184X0016 | F/AEI       | ouvrage      | 585575 | 1115740 | 149.50 | 149.06 | 34.00        | 01/03/61  | 115.06     |
| 82   | 02184X0018 | F           | ouvrage      | 580570 | 1114460 | 165.25 | 164.60 | 57.00        | 15/05/61  | 107.60     |
| 83   | 02184X0019 | F           | ouvrage      | 580230 | 1114945 | 164.25 | 164.13 | 52.50        | 15/05/61  | 111.63     |
| 84   | 02184X0023 | F/AEP       | ouvrage      | 583400 | 1116454 | 157.50 | 157.08 | 34.70        | 09/05/95  | 122.38     |
| 85   | 02184X0026 | S1          | ouvrage      | 584800 | 1119250 | 105.00 | 106.45 | 4.60         | 25/03/65  | 101.85     |
| 86   | 02184X0041 | F           | ouvrage      | 585230 | 1117910 | 153.00 | 153.08 | 39.60        | 01/11/74  | 113.48     |
| 87   | 02184X0061 | F1          | ouvrage      | 586328 | 1115940 | 152.00 | 152.06 | 29.80        | 08/12/97  | 122.26     |
| 88   | 02191X0017 | SD          | ouvrage      | 592820 | 1115630 | 81.30  | 87.75  | 3.60         | 01/01/01  | 84.15      |
| 89   | 02191X0033 | P2/AEP      | ouvrage      | 587400 | 1114400 | 156.00 | 155.08 | 40.33        | 01/01/52  | 114.75     |
| 90   | 02191X0035 | CEA/F4      | ouvrage      | 587920 | 1115920 | 151.00 | 149.87 | 37.30        | 01/01/64  | 112.57     |
| 91   | 02191X0036 | CEA/F1      | ouvrage      | 587760 | 1116140 | 153.50 | 150.90 | 34.90        | 09/05/95  | 116.00     |
| 92   | 02191X0037 | CEA/F2      | ouvrage      | 587710 | 1116430 | 153.50 | 156.02 | 41.30        | 09/05/95  | 114.72     |
| 93   | 02191X0038 | CEA/F3      | ouvrage      | 588160 | 1115890 | 153.50 | 151.89 | 34.30        | 09/05/95  | 117.59     |
| 94   | 02191X0049 | CEA/F5      | ouvrage      | 588040 | 1115930 | 150.00 | 150.86 | 38.95        | 14/01/65  | 111.91     |
| 95   | 02191X0050 | S1          | ouvrage      | 587330 | 1118390 | 90.50  | 93.57  | 2.10         | 28/12/65  | 91.47      |
| 96   | 02191X0057 | S1          | ouvrage      | 587450 | 1117990 | 92.60  | 95.36  | 0.40         | 25/10/68  | 94.96      |
| 97   | 02191X0063 | F           | ouvrage      | 590920 | 1115030 | 92.00  | 91.00  | 4.50         | 03/10/82  | 86.50      |
| 98   | 02191X0079 | F           | ouvrage      | 586825 | 1117130 | 156.00 | 151.71 | 43.00        | 31/01/95  | 108.71     |
| 99   | 02191X0081 | F2          | ouvrage      | 587020 | 1116440 | 153.00 | 153.48 | 36.40        | 31/01/98  | 117.08     |
| 100  | 02192X0111 | S32BIS      | ouvrage      | 594010 | 1113170 | 100.00 | 96.19  | 6.50         |           | 89.69      |
| 101  |            | CEA/F22     | ouvrage      | 587070 | 1111523 |        | 87.64  | 8.10         | 12/04/95  | 79.54      |
| 102  |            | CEA/F27     | ouvrage      | 589108 | 1112087 |        | 97.53  | 11.90        |           | 85.63      |
| 103  |            | CEA/F41     | ouvrage      | 586638 | 1113880 | 157.76 | 157.62 | 39.60        | moy 82-92 | 118.02     |
| 104  |            | CEA/F42     | ouvrage      | 586530 | 1114245 | 157.64 | 157.72 | 38.60        | moy 82-92 | 119.12     |
| 105  |            | CEA/F43     | ouvrage      | 585770 | 1114027 | 157.77 | 156.80 | 40.00        | moy 82-92 | 116.80     |

| INDR | indice     | DESIGNATION | nature  | X      | Y       | Z_BSS  | Z_MNT  | PROF_EAU_SOL | DATE_EAU  | COTE_PIEZO |
|------|------------|-------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------------|-----------|------------|
| 106  |            | CEA/F44     | ouvrage | 585430 | 1113633 | 153.00 | 151.76 | 38.50        | moy 82-92 | 113.26     |
| 107  |            | CEA/F45     | ouvrage | 586190 | 1113575 | 153.47 | 154.98 | 36.30        | moy 82-92 | 118.68     |
| 108  | 02184X0060 | source      | source  | 580300 | 1116080 | 114.00 | 120.10 | 0.00         |           | 120.10     |
| 109  | 02191X0061 | source      | source  | 590260 | 1114530 | 103.00 | 102.73 | 0.00         |           | 102.73     |
| 110  |            | CEA/F24     | source  | 584564 | 1113650 |        | 103.89 | 0.00         |           | 103.89     |
| 111  |            | source      | source  | 579730 | 1116320 | 125.00 | 126.70 | 0.00         |           | 126.70     |
| 112  |            | source      | source  | 579920 | 1116260 | 120.00 | 123.64 | 0.00         |           | 123.64     |
| 113  |            | source      | source  | 581680 | 1114810 | 100.00 | 124.88 | 0.00         |           | 124.88     |
| 114  |            | source      | source  | 581830 | 1114790 | 100.00 | 110.20 | 0.00         |           | 110.20     |
| 115  |            | source      | source  | 582310 | 1114610 | 100.00 | 118.21 | 0.00         |           | 118.21     |
| 116  |            | source      | source  | 582520 | 1114360 | 97.50  | 103.19 | 0.00         |           | 103.19     |
| 117  |            | source      | source  | 583480 | 1113460 | 92.00  | 89.48  | 0.00         |           | 89.48      |
| 118  |            | source      | source  | 581210 | 1111890 | 75.00  | 88.55  | 0.00         |           | 88.55      |
| 119  |            | source      | source  | 583360 | 1111390 |        | 67.08  | 0.00         |           | 67.08      |
| 120  |            | source      | source  | 584140 | 1111520 |        | 76.16  | 0.00         |           | 76.16      |
| 121  |            | source      | source  | 584240 | 1112240 |        | 76.69  | 0.00         |           | 76.69      |
| 122  |            | source      | source  | 584320 | 1112280 |        | 79.04  | 0.00         |           | 79.04      |
| 123  |            | source      | source  | 586140 | 1111120 |        | 73.48  | 0.00         |           | 73.48      |
| 124  |            | source      | source  | 583910 | 1111380 |        | 72.08  | 0.00         |           | 72.08      |
| 125  |            | source      | source  | 583000 | 1114300 |        | 105.21 | 0.00         |           | 105.21     |
| 126  |            | source      | source  | 582510 | 1114620 |        | 117.41 | 0.00         |           | 117.41     |
| 127  |            | source      | source  | 581640 | 1115000 |        | 105.49 | 0.00         |           | 105.49     |
| 128  |            | source      | source  | 581470 | 1115380 |        | 118.25 | 0.00         |           | 118.25     |
| 129  |            | source      | source  | 589080 | 1117970 |        | 82.48  | 0.00         |           | 82.48      |
| 130  |            | source      | source  | 588912 | 1117562 | 110.00 | 96.54  | 0.00         |           | 96.54      |
| 131  |            | source      | source  | 590887 | 1116880 | 85.00  | 75.85  | 0.00         |           | 75.85      |
| 132  | 02192X0156 |             | ouvrage | 594980 | 1113080 |        | 93.50  | 10.40        |           | 83.10      |
| 133  | 02192X0270 |             | ouvrage | 595760 | 1112270 |        | 87.10  | 5.00         |           | 82.10      |
| 134  | 02192X0271 |             | ouvrage | 597700 | 1113220 |        | 87.00  | 8.00         |           | 79.00      |

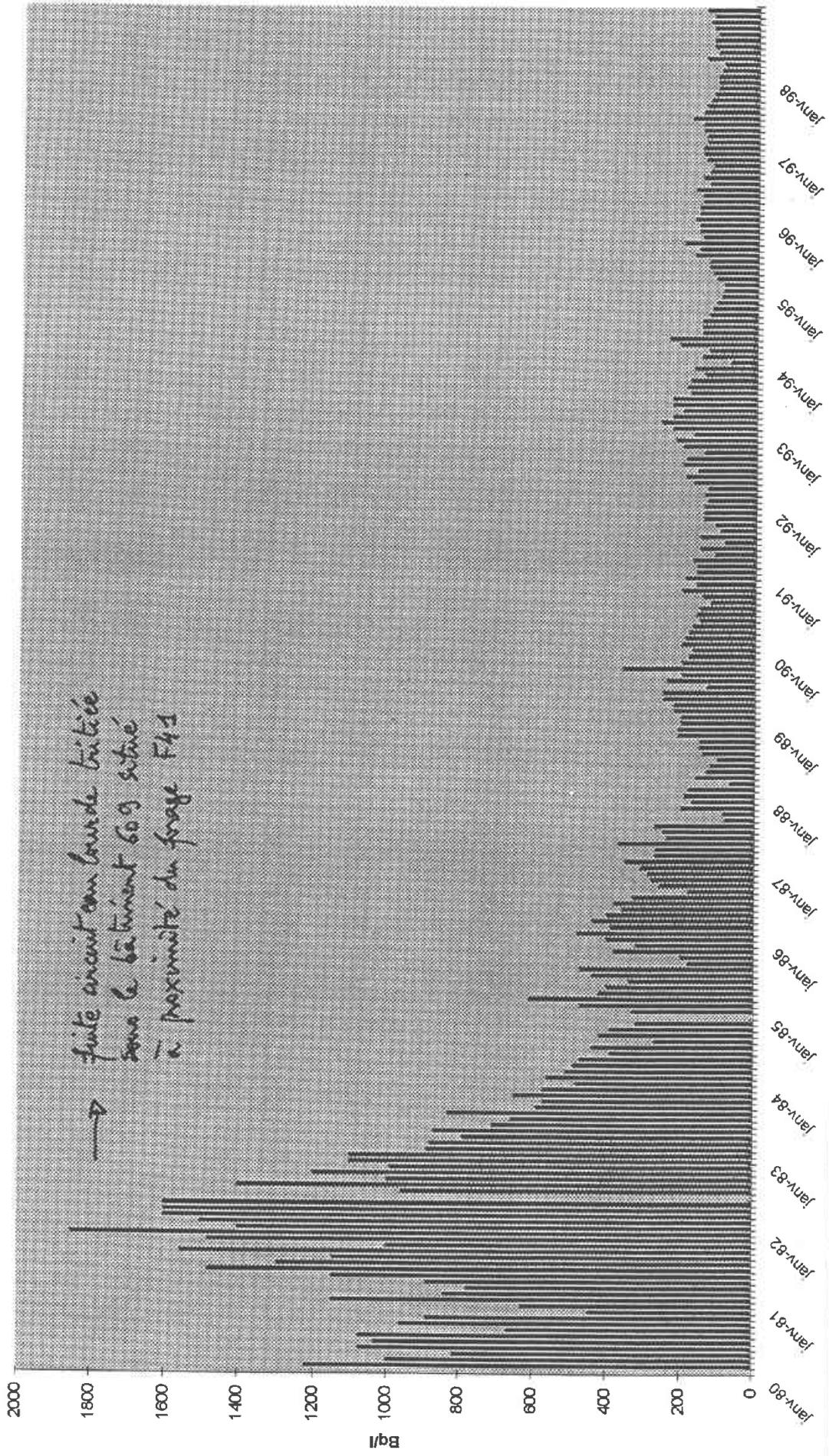
## **Annexe 3**

### **réseau de surveillance du CEA : suivi de la radioactivité**

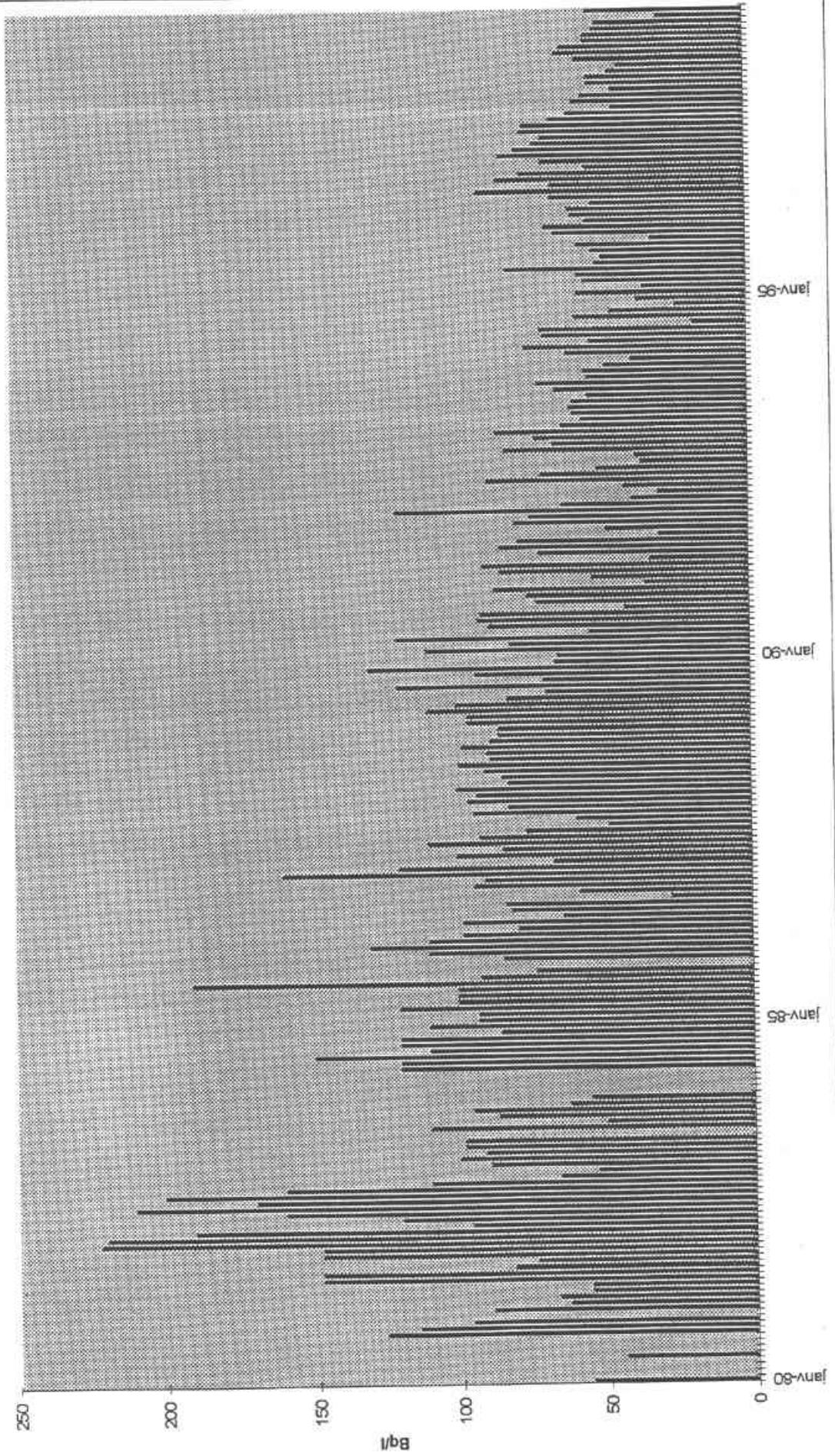
Activité volumique en tritium dans le forage F44 de 1980 à 1998



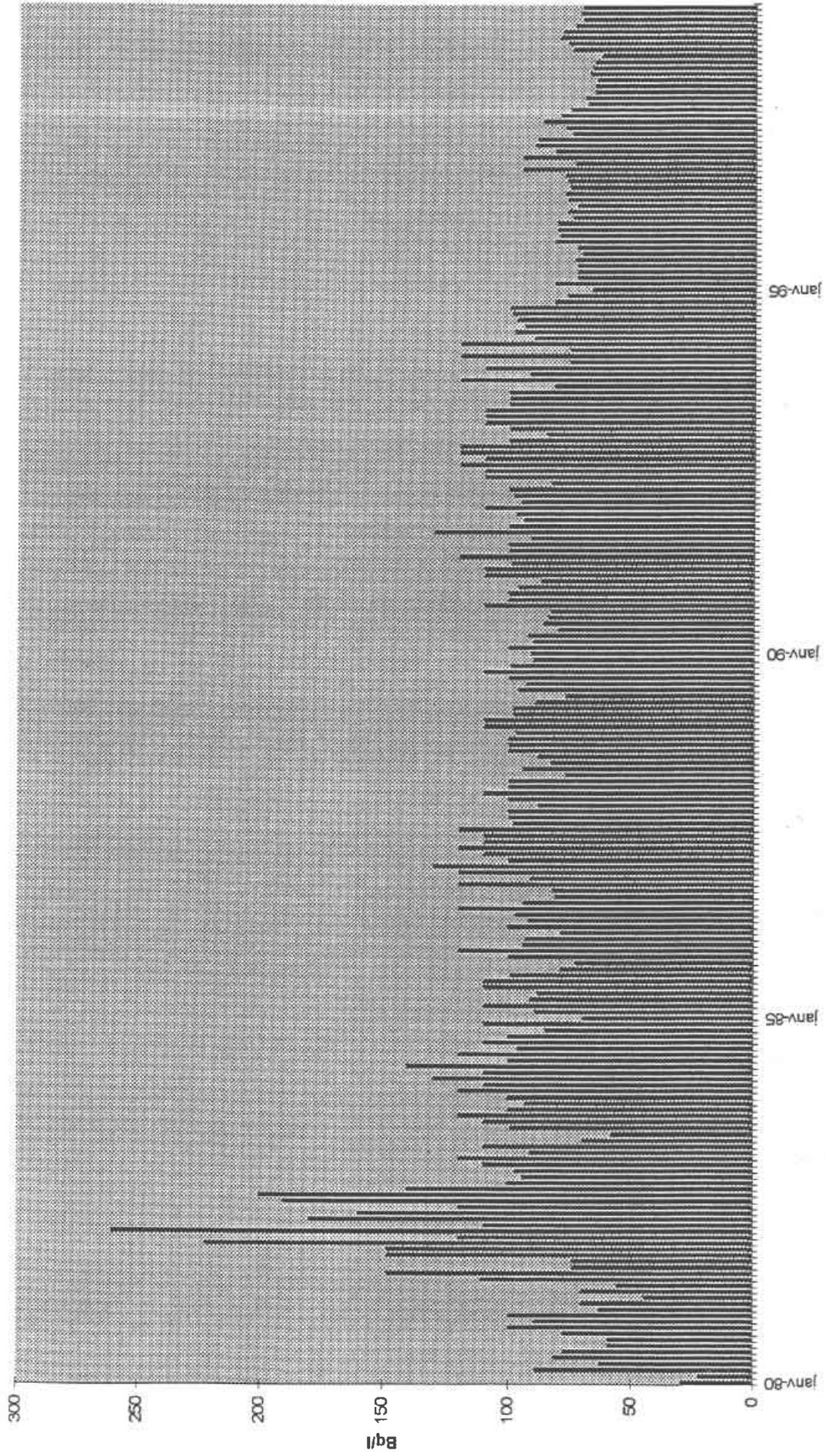
Activité volumique en tritium dans le forage F41 de 1980 à 1998



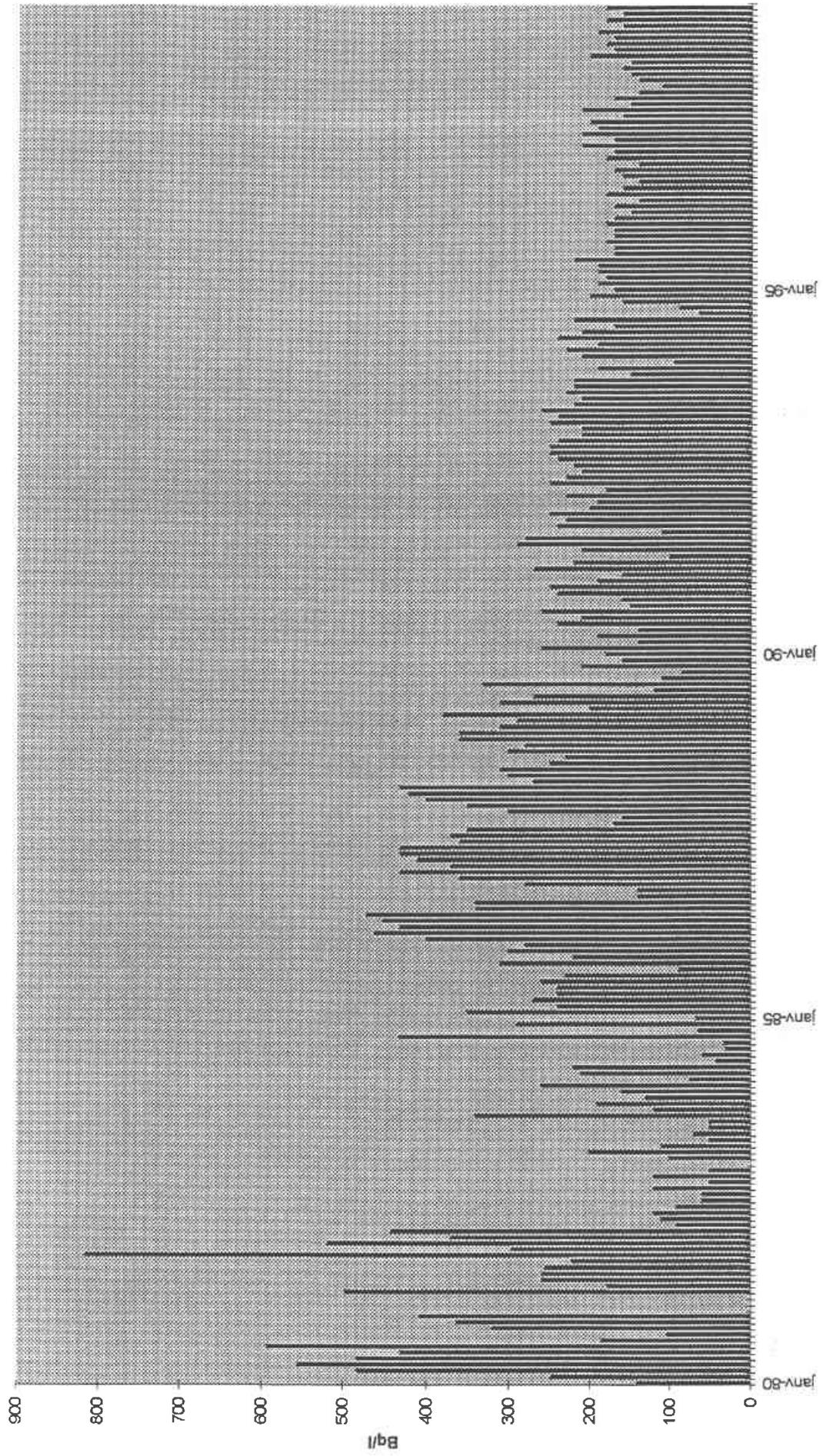
Activité volumique en tritium dans le forage F45de 1980 à 1998



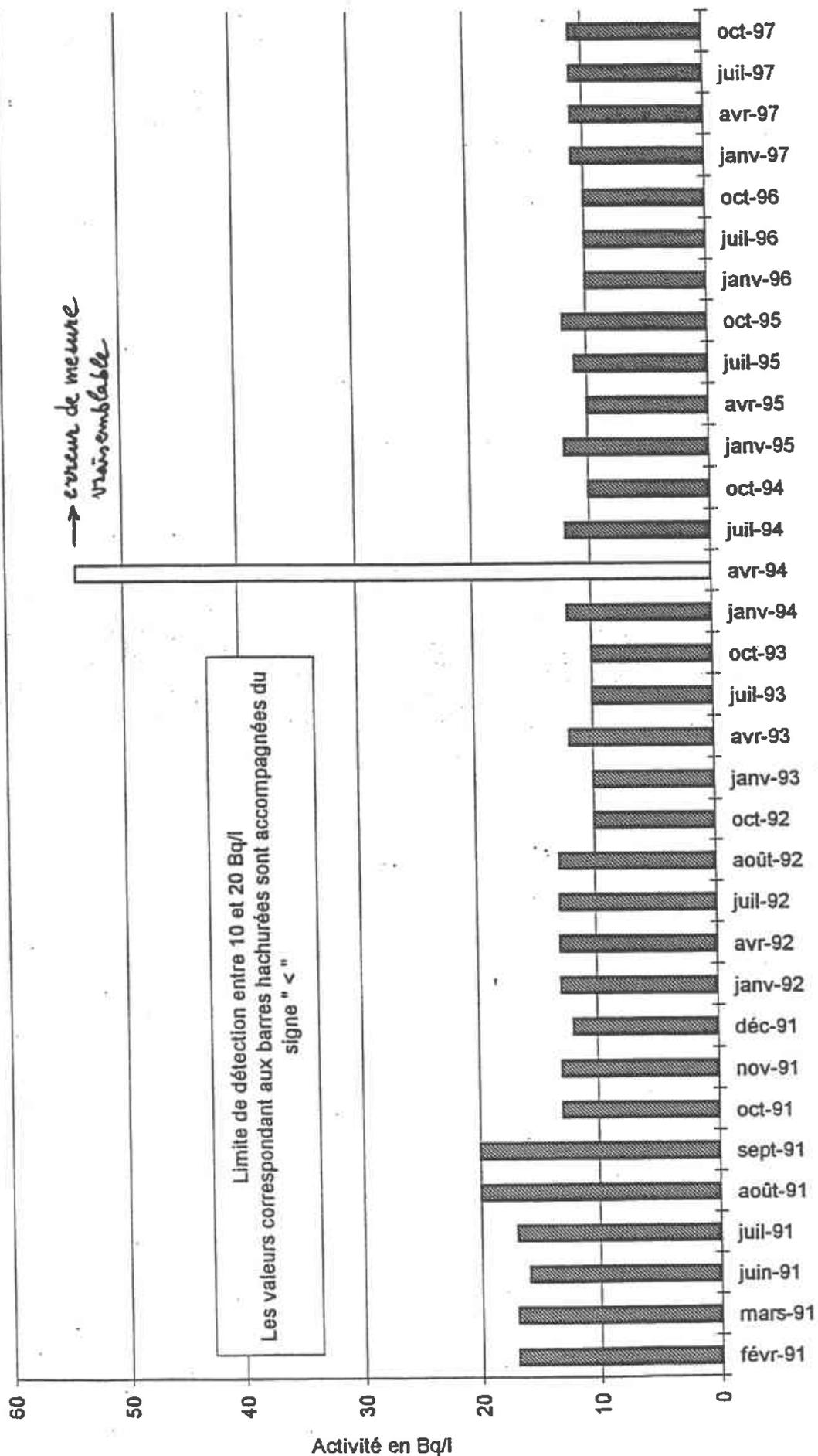
Activité volumique en tritium dans le forage F43 de 1980 à 1998



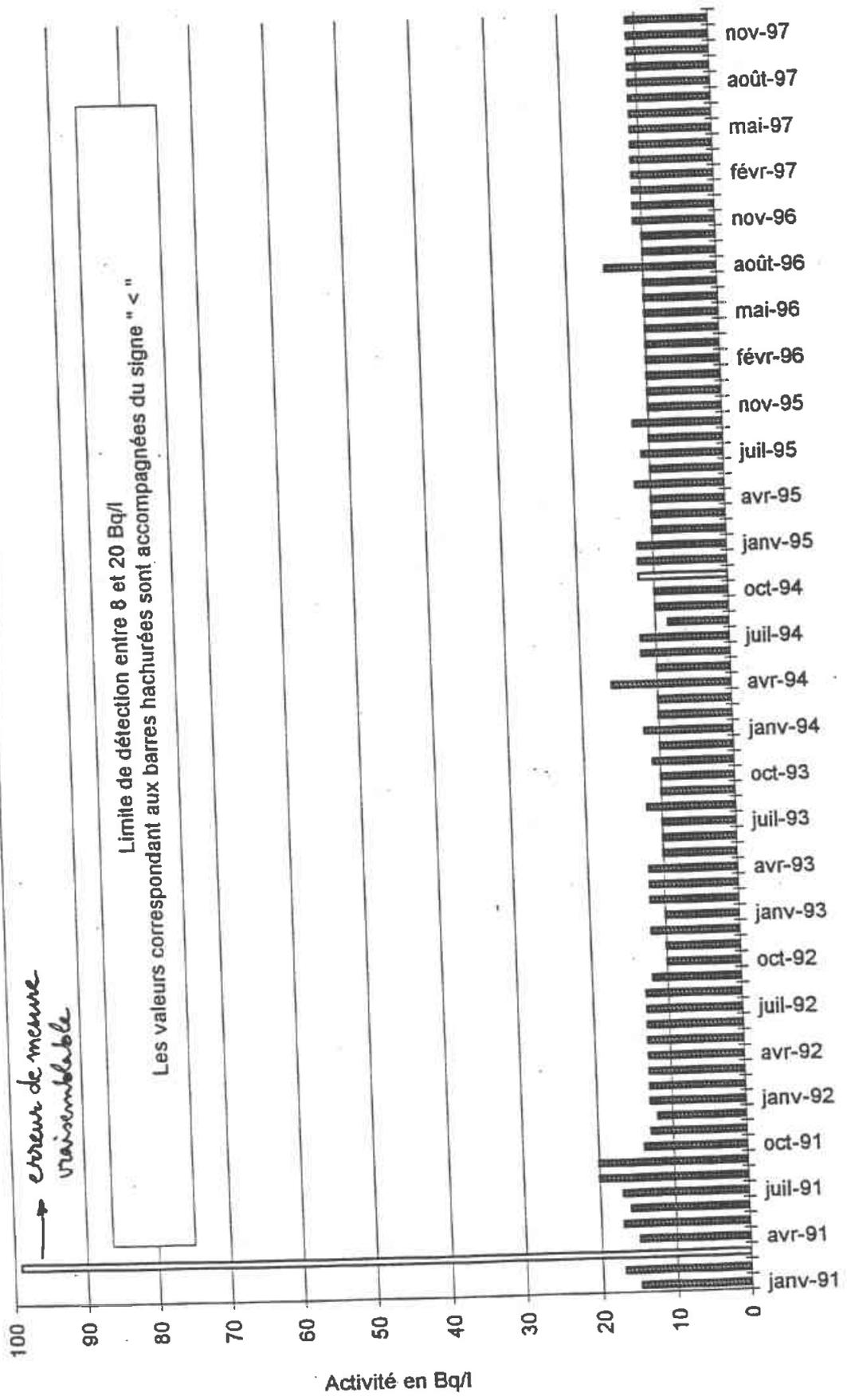
Activité volumique en tritium dans le forage F42 de 1980 à 1998



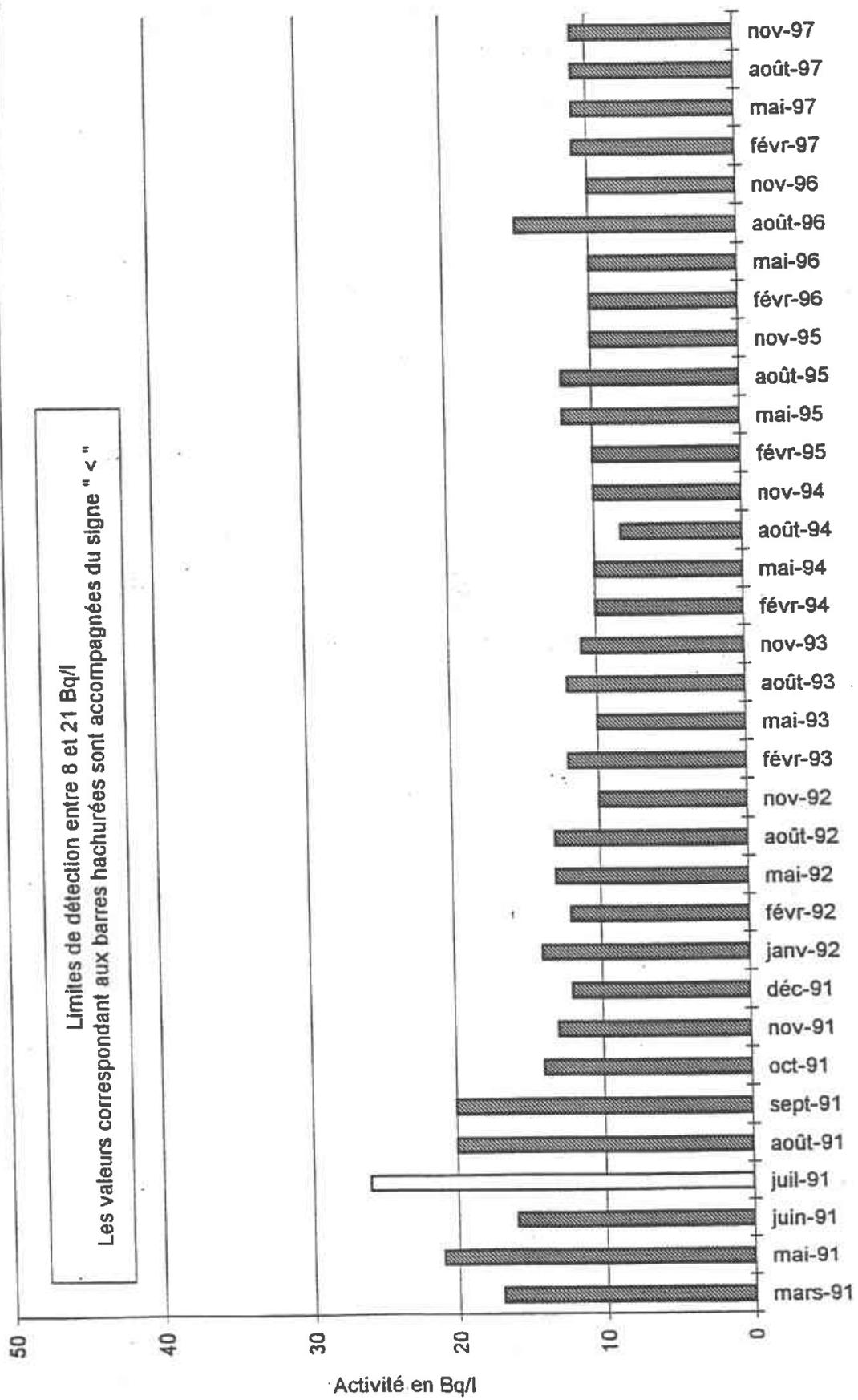
Activité volumique de l'eau en Itridium au point de surveillance F15 (Résurgence CNRS- Ferme)  
Nappe des sables de Fontainebleau



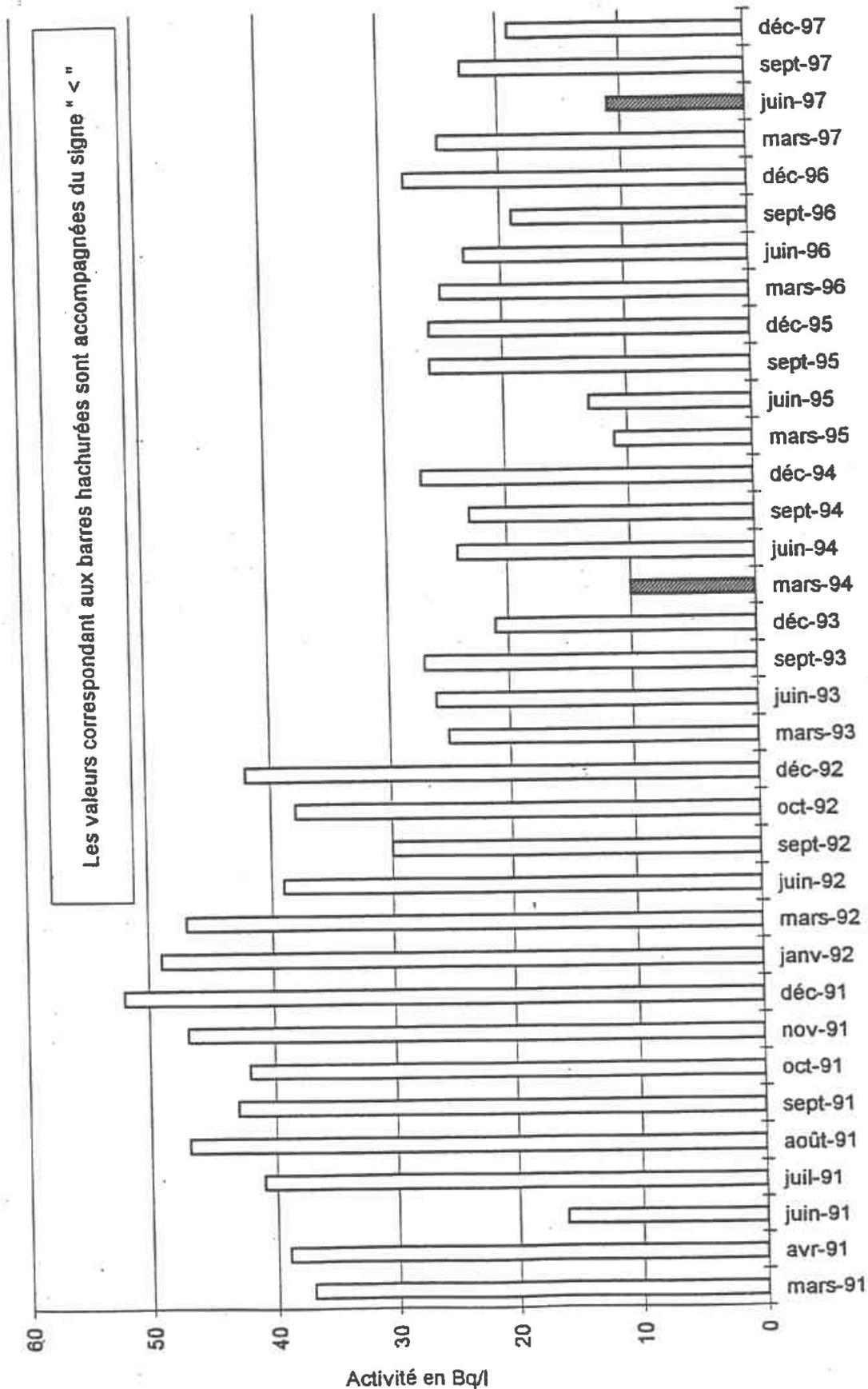
Activité volumique de l'eau en tritium au point de surveillance F22 (Forage chez un particulier à Bures sur Yvette)  
Nappe des sables de Fontainebleau



Activité volumique de l'eau en tritium au point de surveillance F19 (Résurgence - Gif-sur-Yvette - CNRS)  
Nappe des sables de Fontainebleau



Activité volumique de l'eau en tritium au point de surveillance F26 (Résurgence - Gif sur Yvette - Cité CEA)  
Nappe des sables de Fontainebleau



*Influence vraisemblable de la déperdition de ST Aubin*

**Tableau de synthèse des résultats de mesure  
de la radioactivité sur les piézomètres  
F2, F24 et F27**

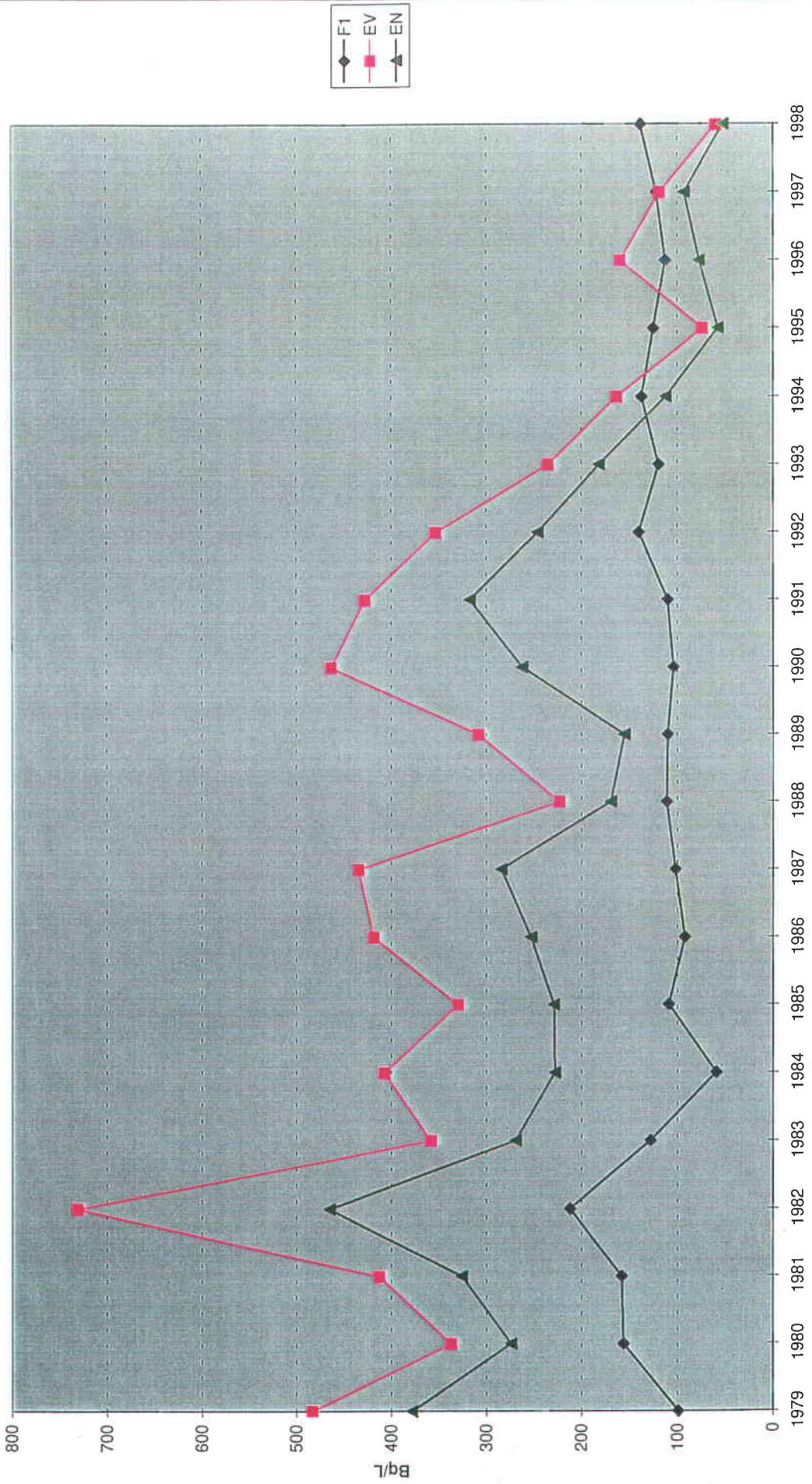
| <b>F2</b>         | Fév.<br>95 | Juin<br>95 | Fév.<br>96 | Avril<br>96 | Juin<br>96 | Fév.<br>97 | Avril<br>97 | Juin<br>97 | Juin<br>98 | Déc.<br>98 |
|-------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| HTO<br>en<br>Bq/l | <10        | <10        | <12        | <10         | <12        | <11        | <11         | <11        | <11        | <11        |

| <b>F24</b>     | Fév.<br>96 | Août<br>96 | Janv.<br>97 | Août<br>97 | Fév.<br>98 | Août<br>98 |
|----------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| HTO<br>en Bq/l | <15        | 22         | 11          | 12         | 12         | 22         |

| <b>F27</b>     | Nov.<br>95 | Juin<br>96 | Nov.<br>96 | Mai<br>97 | Nov.<br>97 | Mai<br>98 | Nov.<br>98 |
|----------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| HTO<br>en Bq/l | <10        | 16         | 15         | <11       | 17         | 19        | <11        |

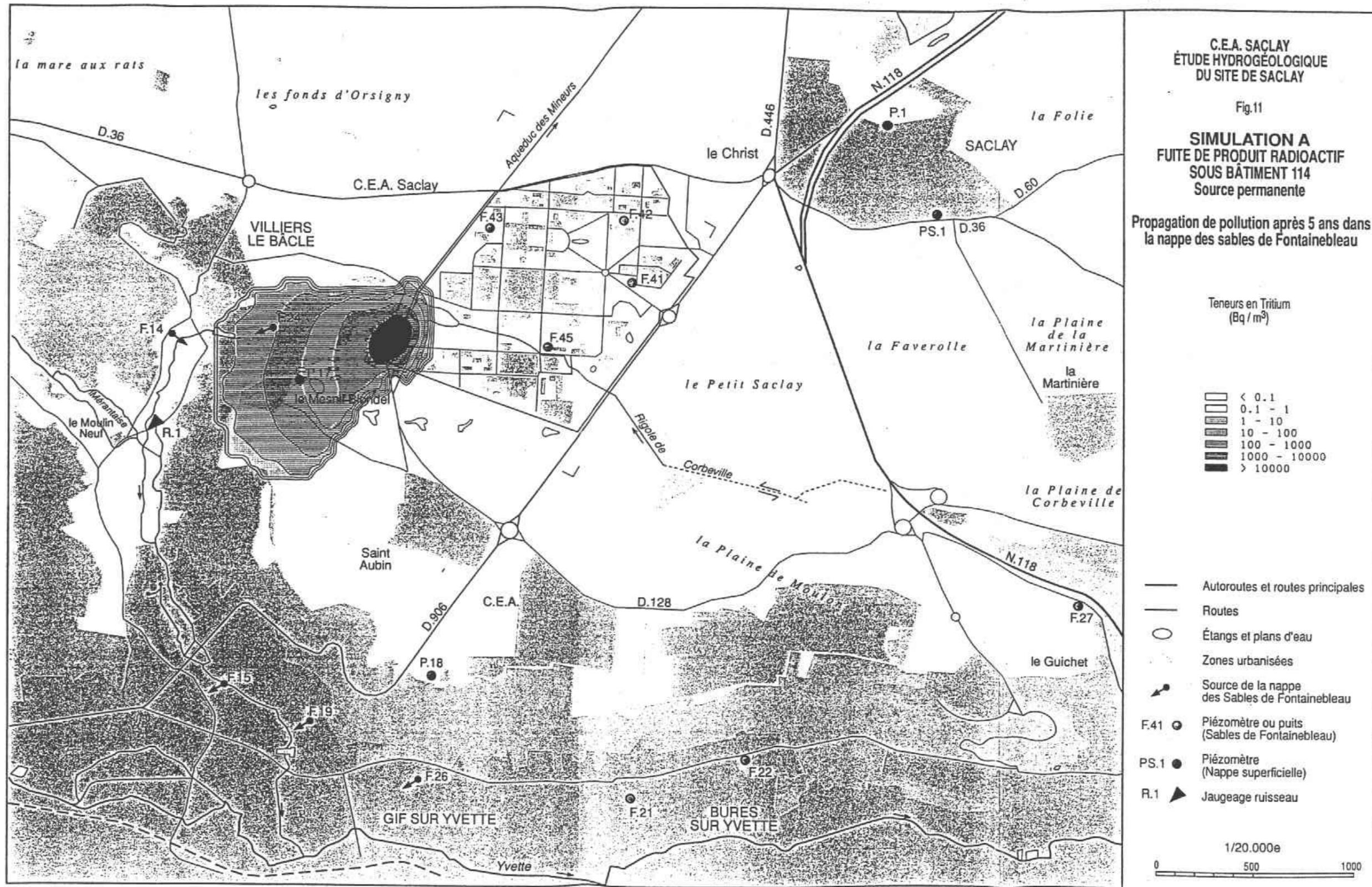
Nota : aucune trace de radionucléides artificiels mise en évidence par spectrométrie  $\gamma$ .

Activités volumiques en tritium des étangs de Saclay et du forage F1

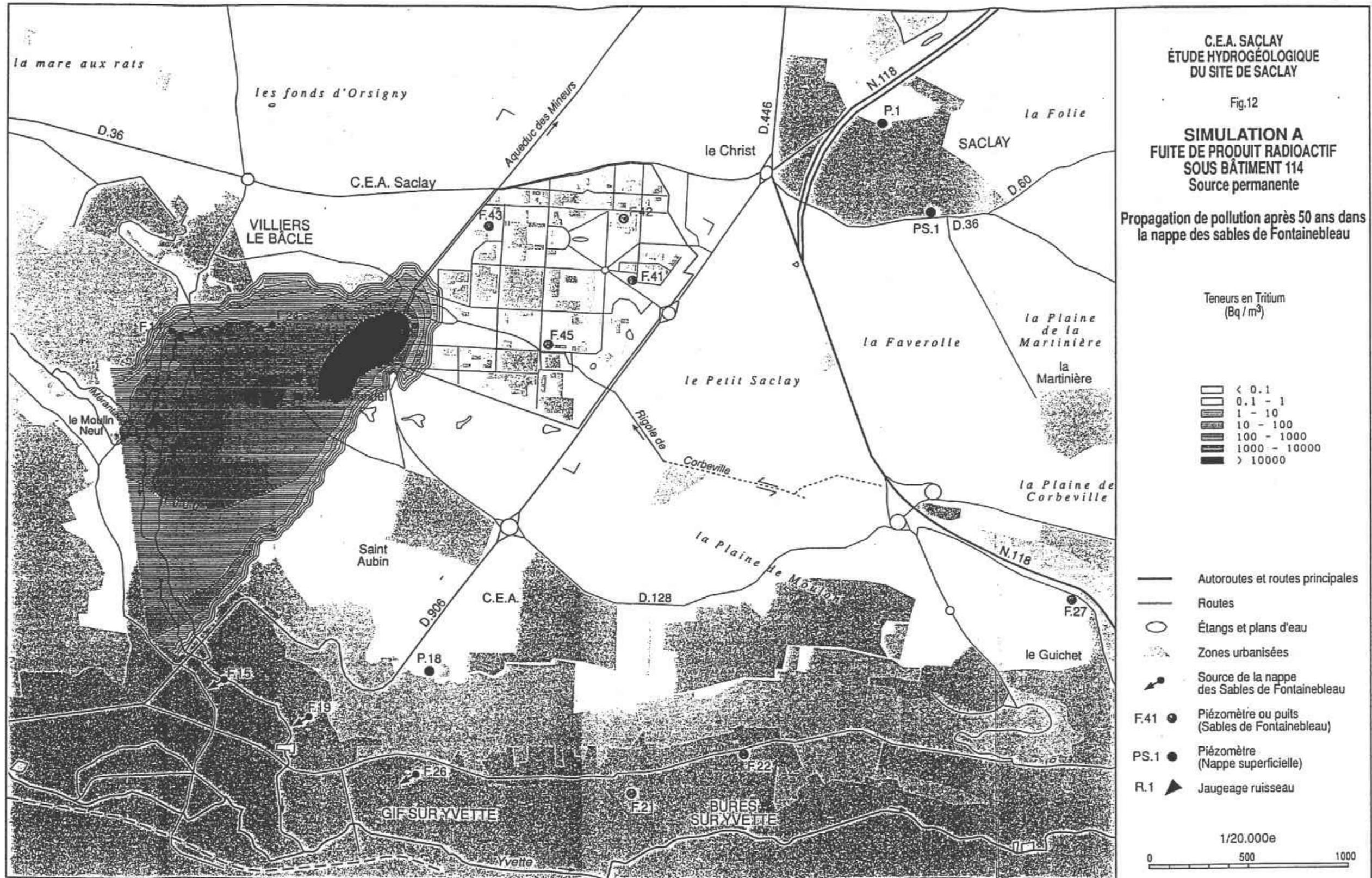


## **Annexe 4**

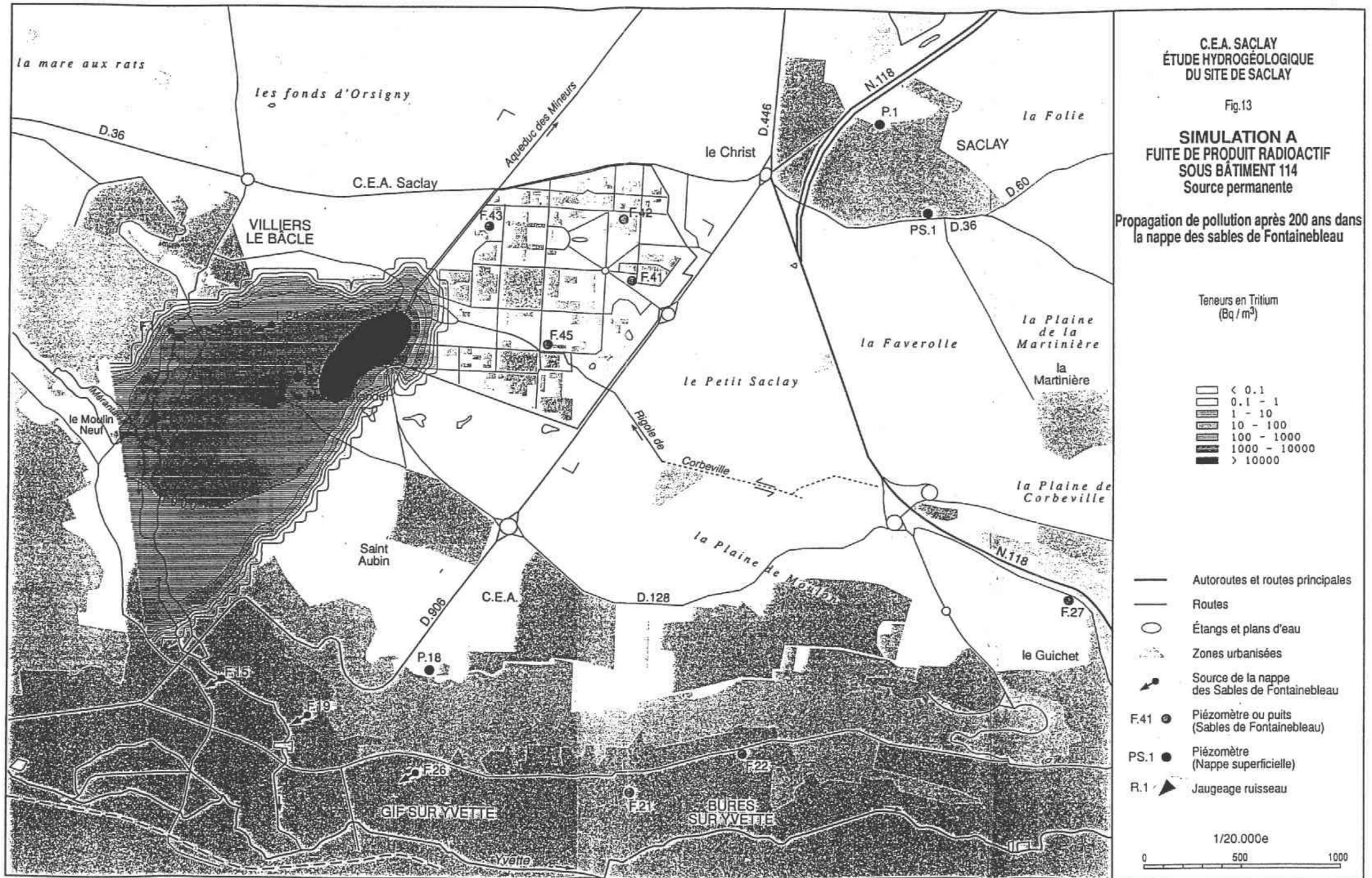
### **Résultats des simulations du BURGEAP**



ECH: 1/20000

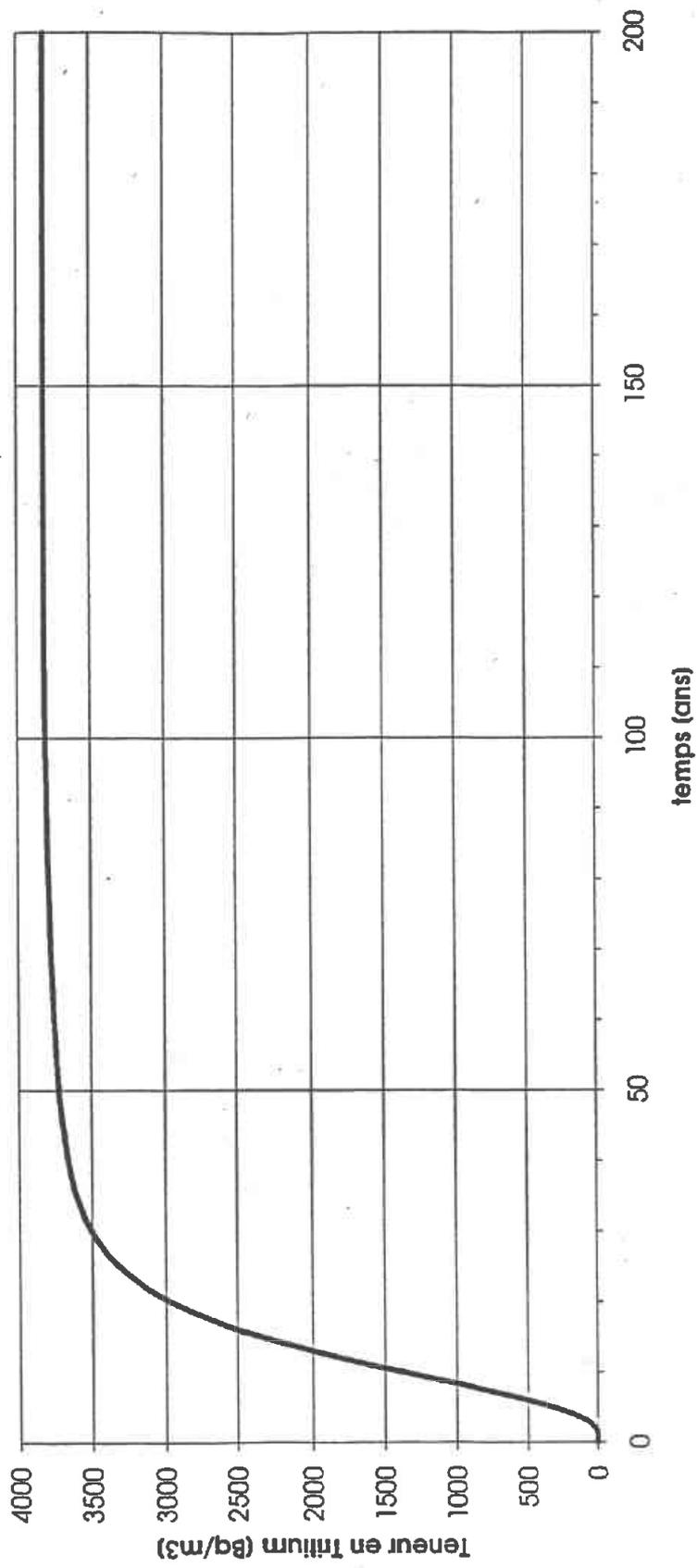


ECH: 1/20000



ECH: 1/20000

SIMULATION A :  
EVOLUTION DE LA CONCENTRATION A LA SOURCE DE VILLIERS





**BRGM**  
**Service Géologique Régional d'Ile-de-France**  
7, rue du Théâtre – 91884 Massy – France  
Téléphone : (33) 01.69.75.10.25 – Télécopieur 01.60.11.73.57