HAL
open science

Monitoring continu de site pollué : mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou de dé pollution

Frédéric Portet

To cite this version:

Frédéric Portet. Monitoring continu de site pollué : mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou de dé pollution. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; INSA de Lyon, 2004. Français. NNT : . tel-00802997

HAL Id: tel-00802997

https://theses.hal.science/tel-00802997v1

Submitted on 20 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée devant

l'Institut National Supérieur des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon

et

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE)

pour obtenir le grade de Docteur

Ecole Doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement)

Spécialité : Sciences et Techniques du Déchet

par

Frédéric PORTET

MONITORING CONTINU DE SITE POLLUE

Mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou de dépollution

Soutenue le 15 janvier 2004

JURY :

Mme	Colette COLLET-GONNET	rapporteur
M.	Jean ROUSSY	rapporteur
Mme	Agnès LABOUDIGUE	examinateur
M.	Jacques BOURGOIS	examinateur
M.	Rémy GOURDON	examinateur
M.	Konrad SZAFNICKI	examinateur
Mlle	Martine LOUVRIER	invitée
M.	Jacques LAVERSANNE	invité

ISBN 2-9507146-3-3

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement :

l'équipe du CNRSSP de Douai (Philippe Branchu, Véronique Milon, Agnès Laboudigue, Paul Lecomte, Frédéric Goldschmidt, et tous les autres) pour m'avoir permis de mener à bien ce projet de monitoring continu de site pollué ;.

l'équipe SITE de l'école des mines de Saint-Etienne (Jacques Bourgois, Didier Graillot, et tous les autres) pour m'avoir supporté durant ces quelques années et plus particulièrement à **Konrad Szafnicki,** particulièrement exposé et toujours disponible ;

MM. **Jacques Laversanne** et **René Lagarde** de Charbonnages de France ;

Mlle **Martine Louvrier** de l'ADEME ;

mes employeurs, **l'Education Nationale** et le **Ministère de l'Equipement**, qui m'ont donné la possibilité de terminer ce travail ;

toutes les personnes que j'oublie (amis, famille, collègues, etc…) qui m'ont aidé dans la conduite et l'achèvement de cette expérience.

Ma carrière se poursuit aujourd'hui au sein de l'**Ecole Nationale des Techniciens de l'Equipement (ENTE) d'Aix-en-Provence** sur des thématiques environnementales axées sur les Risques Naturels et l'Information Géographique.

A très bientôt et encore merci.

Fred PORTET

frederic.portet@equipement.gouv.fr

SOMMAIRE

Introduction 13

I. Avant propos 15

I.1. Politique Nationale Française de traitement et de réhabilitation des sols pollués 15

I.2. Processus de transferts de pollution dans le sols 17

I.3. Risques d'une pollution d'un sol 18

I.4. Application à la gestion des sites et sols pollués 19

I.5. Problématique 20

I.6. Recensement des sites pollués 20

I.7. Industrie charbonnière 22

I.8. Objectif général 23

I.9. Objectif spécifique du travail 24

II. Mise en place du Monitoring Continu de Site 25

II.1. Méthodologie de travail 25

II.2. Pourquoi ? Méthodologie proposée 26

II.3. Caractérisation du site expérimental : ancien site de pyrolyse du charbon (cokerie) 28

II.3.1. Principe de fonctionnement d'une cokerie 28

II.3.2. Localisation des installations sensibles d'une cokerie 29

II.3.3. Pollution résiduelle sur les sites d'anciennes cokeries 31

II.3.4. Mise en situation 40

II.3.5. Géologie du site 42

II.4. Caractérisation de la pollution des sols du site expérimental (pollution de surface) 43

II.4.1. Campagne d'échantillonnage des sols (juin 1998) 43

II.4.2. Méthodes analytiques 46

II.4.3. Résultats des analyses (août 1998) 47

II.5. Caractérisation de l'extension de la pollution dans la nappe superficielle (pollution diffuse) 51

II.5.1. Méthodes d'échantillonnage des eaux (octobre 1998) 53

II.5.2. Méthodes d'analyses 53

II.5.3. Teneur en HAP dans la nappe superficielle 53

II.5.4. Teneurs en BTEX dans la nappe 59

II.6. Etude hydrogéologique 62

II.6.1. Observations 62

II.6.2. Influence de la piézométrie sur le transport 64

II.7. Modélisation du transport de la pollution dans la nappe superficielle 66

II.7.1. Objectifs 66

II.7.2. Choix du modèle 66

II.7.3. Description de Feflow 67

II.7.4. Résolution des équations 68

II.7.5. Discrétisation de la zone d'étude 69

II.7.6. Modélisation hydrodynamique 70

II.7.7. Calage 76

II.7.8. Modélisation du transport : cas du naphtalène 79

II.8. Instrumentation du Site 84

II.8.1. Indicateurs de pollutions retenus 84

II.8.2. Sélection et choix des analyseurs 84

II.8.3. Implantation des points de mesure et du local d'analyse 104

II.8.4. Mise en service des analyseurs dans les conditions de fonctionnement 105

II.8.5. Système d'acquisition des données 111
II.8.6. Mode Opératoire 124
II.8.7. Analyse de l'eau 124
II.8.8. Analyse du gaz 125
II.8.9. Programmation des acquisitions 125
II.8.10. Programmation des automatismes 126

III. Exploitation des résultats 127

III.1. Acquisition et visualisation des mesures brutes d'analyses 127

III.2. Echantillon de données brutes entre le 4 et 20 août 2000 132

III.3. Dysfonctionnements provoqués et influence sur la fluorescence UV 135
III.3.1. Période sans maintenance 135
III.3.2. Influence d'un simple nettoyage de la cellule 136
III.3.3. Etude d'un arrêt prolongé du système 137
III.3.4. Impact d'une modification de débit 138
III.3.5. Etude d'une modification technique sur l'appareil. 139
III.3.6. Conclusion sur le fonctionnement du Fluorimètre UV 140

III.4. Traitement des données acquises 140
III.4.1. Elaboration d'une méthodologie de correction 140
III.4.2. Expériences 140
III.4.3. Résultats des expériences 143
III.4.4. Bilan des expériences conduites 145
III.4.5. Conclusion/ Discussion 148

III.5. Evolution des teneurs en biogaz 150

III.6. Enregistrements des paramètres généraux 155

III.7. Sondes multiparamètres 156
III.7.1. Conductivité 157
III.7.2. Potentiel rédox 158
III.7.3. Bilan sondes multiparamètres 159

III.8. Restitution des données 160
III.8.1. Procédure retenue 160
III.8.2. Interface d'acquisition et de traitement Visual Basic © 160

IV. Retour d'expérience sur l'installation d'un Monitoring de Site 165

IV.1. Etude d'un projet de Monitoring 165

IV.2. Alimentation en ressources (énergies, télécom et eau) 165

IV.3. Choix du type d'équipements 165
IV.3.1. Pompes immergées et régulation des débits 166
IV.3.2. Précision des capteurs et des analyseurs 166
IV.3.3. Analyse de la teneur en HAP 167
IV.3.4. Branchement des capteurs/analyseurs 167
IV.3.5. Matériel hydraulique, électrique ou pneumatique 169
IV.3.6. Dispositifs de contrôle (visuels) 169
IV.3.7. Automatisme et acquisition des données 170

IV.4. Pilotage à distance 171

Conclusion et perspectives 175

Références bibliographiques 179

Annexes 185

Annexe 1 : Toxicité des HAP 187

Annexe 2 : Propriétés des HAP 193

Annexe 3 : Four à coke - Cokerie - Ensemble général 199

Annexe 4 : Implantation et description des piézomètres 203

Annexe 5 : Exemple d'une fiche signalétique de prélèvement 207
Annexe 6 : Protocoles opératoires HAP, COT et azote ammoniacal 211
Annexe 7 : Echantillonnage sur l'emprise de la cokerie 217
Annexe 8 : Résultats bruts des analyses HAP dans le sol 223
Annexe 9 : Echantillonnage du sol et analyse de l'azote amoniacal 227
Annexe 10 : Etude antérieure : paramètres hydrogéologiques 231
Annexe 11 : La foration 239
Annexe 12 : Analyses des HAP dans les eaux de la nappe 245
Annexe 13 : Concentrations en HAP des eaux des Pz9-Pz18-Pz19 en novembre 1999 249
Annexe 14 : Concentrations en HAP des eaux des Pz9-Pz18-Pz19 en mars 2000 253
Annexe 15 : Références des fabricants/distributeurs d'instruments 257
Annexe 16 : Concentrations en HAP des eaux des piézomètres Pz9A-Pz18A-Pz19A 267
Annexe 17 : Evolution de la fluorescence UV / mode de conservation de l'échantillon 271
Annexe 18 : Sondages piézométriques Pz9A, Pz18A et Pz19A 277
Annexe 19 : Grafcet des automatismes – Programmation de l'automate 283
Annexe 20 : Recueil des analyses journalières de mai 2000 à décembre 2001 287
Folio administratif 306

TABLE DES FIGURES

Figure 1: *Processus de transfert de pollution dans le sol (d'après Radilla, 1994)* 17
Figure 2 : *Analyses des risques pour les sites et sols pollués* 18
Figure 3 : *Logigramme de gestion des sites potentiellement pollués vis à vis du risque (d'après BRGM).* 19
Figure 4 *: Première expérimentation du Diagnostic Approfondi et l'Etude Détaillée des Risques (EDR) avant même que la réglementation soit devenue effective le 12 décembre 1999 : friche de l'ancienne cokerie de Saint-Dizier en Haute Marne [Magazine de l'INERIS n°1, juillet 2000]* 20
Figure 5 : L*ocalisation des sites BASOL (DRIRE Nord-Pas-de-Calais)* 21
Figure 6 : *Méthodologie du Monitoring Continu de Site Pollué* 27
Figure 7 : *Schéma des opérations carbochimiques d'une cokerie* 29
Figure 8 : *Localisation des ateliers sensibles sur une cokerie (exemple de l'ancienne cokerie de St.-Dizier qui présente une configuration sensiblement identique au site étudié)* 30
Figure 9 : *Représentation schématique des 16 HAP de l'US-EPA avec formule brute et abréviation des composés (*)* 32
Figure 10 : *Représentation schématique du comportement de différents composés organiques dans le sol : HAP (d'après Pellet, 1994) (PR) : phase résiduelle, (PS) : phase soluble, (PA) : phase d'accumulation* 37
Figure 11 : *Structure chimique des BTEX (d'après Lide, 1997)* 37
Figure 12 : *Représentation schématique du comportement de différents composés organiques dans le sol : HAP (d'après Pellet, 1994) (PR) : phase résiduelle, (PS) : phase soluble, (PA) : phase d'accumulation, (PV) : phase volatile* 39
Figure 13 *: Mise en situation du site expérimental (BD Topo © de l'IGN sous SIG Arcview ©)* 41
Figure 14 : *Coupe hydrogéologique type du site* 42
Figure 15 *: Représentation du maillage sur le plan d'ensemble de la cokerie superposé au plan d'ensemble de la cokerie de 1924* 44
Figure 16 : *Répartition spatiale des teneurs en 16 HAP dans le sol de l'ancienne cokerie toutes profondeurs confondues (analyses d'août 1998 des échantillons prélevés en juin 1998)* 47
Figure 17 : *Spectre de répartition (en % massique) des 16 HAP de l'EPA du goudron pur (fosse A3)* 49
Figure 18 : *Implantation des piézomètres de la nappe superficielle, visualisation sous ArcView ©* 52
Figure 19 : *Cartographie de la pollution pour les 16 HAP dans la nappe superficielle* 52
Figure 20 : *Sommes des 6 HAP (UE) et 16 HAP (US-EPA) pour les piézomètres les plus pollués de la nappe superficielle* 54
Figure 21 : *Distribution (%)des HAP de la liste de l'US-EPA (Figure 9) pour les piézomètres les plus pollués* 56
Figure 22 : *Distribution (% / Σ16 HAP) du naphtalène (2 cycles), acénaphtylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène (3 cycles), fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène et chrysène (4 cycles) dans les piézomètres depuis une zone source (spectre "1") vers le canal (spectre "3")* 58
Figure 23 :*Distribution (% / Σ16 HAP) des 16 HAP de l'US-EPA dans les piézomètres depuis une zone source (spectre "1") vers l'est (spectre "2")* 58
Figure 24 : *Concentrations en BTEX dissous (µg/L, échelle logarithmique) dans l'eau des différents piézomètres et valeurs limites correspondantes pour les eaux de consommation (OMS).* 60
Figure 25 : *Répartition des différents BTEX (%) depuis une zone source (Pz20 et Pz8) vers le canal (Pz4 et Pz5)* 60
Figure 26 : *Evolution des hauteurs piézométriques de la nappe superficielle (IGN69)* 63
Figure 27 : *Interpolation de la surface piézométrique en hautes eaux (BD Topo © sous SIG Arcview ©)* 65
Figure 28 : *Interpolation de la surface piézométrique en basses eaux (BD Topo © sous SIG Arcview ©)* 65
Figure 29 : *Discrétisation 3D sous Feflow ©. Les traits fins rouges représentent les voies de communication (de part et d'autre du canal) et le substratum n'est pas représenté 1ère (peu épaisse) et 2ème couche : tourbe/sable 3ème et 4ème couche : grave 5ème couche : substratum argileux* 70
Figure 30 : *Conditions de transfert à l'interface canal/nappe superficielle h : charge de la nappe h_2^R : charge du canal d : épaisseur de la zone de transfert [a] hautes eaux [b] basses eaux* 71
Figure 31 : *Niveaux piézométriques de la nappe superficielle pour l'année 1999 (IGN69) (attention, pour des raisons de lisibilité les points de mesures sont reliés par des traits). Les Pz20 et Pz22 très pollués (goudron pur) ne sont pas suivis Le Pz8 est enlever en raison de son dysfonctionnement* 72
Figure 32 : *Conditions limites de transfert sur la berge du canal et conditions limites de charge hydraulique cyclique pour les autres points du contour* 73
Figure 33 : *Bilan hydrique des pluies (d'après Gaume, 2002)* 74
Figure 34 : *Pluviométrie de l'année 1999 - station Lambersart-59 (d'après Agence Eau Artois Picardie)* 75

Figure 35 : *Répartition de la pluie efficace en moyennes mensuelles sous Feflow ©* 76
Figure 36 : *Simulation hydrodynamique de l'évolution de la piézométrie sur 2 cycles (2 années)* 78
Figure 37 : *Conditions aux limites pour la concentration en naphtalène* 80
Figure 38 : *Vue en plan de la modélisation du transport du naphtalène sur 100 ans dans la couche de grave (horizon productif de l'aquifère situé entre 6 et 10 m de profondeur et surplombant le substratum imperméable). Les codes couleurs caractérisent les concentrations en mg/l de naphtalène et les courbes de leur évolution dans le temps en différents piézomètres* 82
Figure 39 : *Dispositif d'analyse par ondes évanescentes à l'aide d'un capteur fibre optique (d'après Michel, 2002)* 87
Figure 40 : *Détection du tétrachloroéthylène - 908cm^{-1}- et du dichlorobenzène – 1120cm^{-1}- (d'après Michel, 2002)* 87
Figure 41 : *Principe de fonctionnement du fluorimètre UV modèle Turner Designs 10 Au 005* 88
Figure 42 : *Schéma général d'une sonde pour des mesures in situ dans la nappe (d'après Branchu, 1997)* 90
Figure 43 : *Sonde multiparamètres Datasonde 4 (www.hydrolab.com)* 91
Figure 44 : *Principe de la chromatographie gazeuse (d'après Branchu, 1997)* 92
Figure 45 : *Principe de fonctionnement d'un PID [a] et d'un FID [b] (d'après Branchu 1997)* 94
Figure 46 : *Principe du pluviomètre (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)* 96
Figure 47 : *Pluviographe à augets - fonctionnement (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)* 96
Figure 48 : *Pluviographe à pesée - fonctionnement (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)* 96
Figure 49 : *Sonde TDR : appareil de mesure et exemples de sondes Trime-FM3 (d'après IMKO : http://www.imko.de)* 97
Figure 50 : *Humidimètre capacitif pour les sols HMS 9000 développé par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Avignon (selon : www.sdec-france.com/fr/HMS9000.html)* 98
Figure 51 : *Principe thermocouple (d'après Angowski et Gatt, 2002) [a]. Exemples de thermocouples [b]* 99
Figure 52 : *Exemples de correspondances entre température et tension (f.é.m) pour différents types de thermocouples (source : TC S.A., www.tcsa.fr)* 99
Figure 53 : *Sonde Pt100 - sonde platine présentant une résistance de 100 Ohms pour une température de 0°C, (138,5 pour 100 °C) (d'après Gatt, 2002)* 100
Figure 54 : *Plan de l'instrumentation du site (BD Topo © sous SIG Arcview ©)* 105
Figure 55 : *Mesures HPLC-UV et Fluorimétrie pour le Pz18/Pz18* 108
Figure 56 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour le Pz19/Pz19* 108
Figure 57 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour le Pz9/Pz9A* 108
Figure 58 : *Evolution de la concentration en ammonium au cours du temps pour le Pz16* 109
Figure 59 : *Evolution du potentiel Rédox au cours du temps pour le Pz16 Les pics résultent des relevages/immersions de la sonde* 110
Figure 60 : *Evolution du taux d'oxygène dissous pour le Pz8. Le pic résulte du relevage/immersion de la sonde* 110
Figure 61 : *Schéma de principe pour l'installation de l'équipement intérieur du local d'analyse.* 111
Figure 62 : *Local d'analyse [M] : station météo sur le toit [L] : lignes 380 V et télécom* 112
Figure 63 : *Aménagement intérieur du local d'analyse : vue d'ensemble [a] ; arrivée conduite, système de rinçage et fluorimètre [b] ; analyseur de biogaz [c].* 113
Figure 64 : *Armoires électriques [a] et centrale d'acquisition [b]* 114
Figure 65 : *Réalisation des tranchées à la pelleteuse pour l'enfouissement de la conduite de refoulement et de l'alimentation électrique* 115
Figure 66 : *Plomberie polypropylène et équipements à l'intérieur du local de mesure* 117
Figure 67 : *Cannes de prélèvement de gaz* 119
Figure 68 : *Rampe de convergence gaz avec pompe à vide* 119
Figure 69 : *Exemple d'une fenêtre de programmation sous DeLogger Pro © : scrutation avec un pas de : 10 min ; entrée analogique 1TK (thermocouple type K) : température intérieure ; entrée analogique 4-V (mesure tension) température extérieure ; entrée analogique 4+V (mesure tension) : humidité air extérieur ; entrée compteur d'impulsion 1HSC: précipitation. AV : signifie un acquisition par moyenne de plusieurs sous acquisitions SPAN : indique la règle de mise à l'échelle à utiliser pour transformation du signal en indicateur physique* 121
Figure 70 : *Exemple de fenêtre de programmation des commandes (alarmes) sous DeLogger Pro ©* 123
Figure 71 : *Visualisation sous format "texte" des acquisitions sous DeLogger Pro ©* 128
Figure 72 : *Visualisation analyses de fluorescence sous DeLogger Pro © : [r] : rinçage ; [Vr] valeur retenue* 129
Figure 73 : *Visualisation analyses biogaz sous DeLogger Pro ©* 130
Figure 74 : *Visualisation températures/pluviométrie sous DeLogger Pro © : Temp Int : température intérieure du local ; Temp Ext : température extérieure* 130
Figure 75 : *Visualisation humidité extérieure sous DeLogger Pro ©* 131
Figure 76 : *Echantillons de fluorescence brute des eaux (août 2000)* 132

Figure 77 : *Echantillons des concentrations en oxygène [%v/v] (août 2000)* 132
Figure 78 : *Echantillons des concentrations en dioxyde de carbone [%v/v] (août 2000)* 133
Figure 79 : *Echantillon de l'évolution des températures et humidités (août 2000)* 133
Figure 80 : *Pluviométrie : journalière et cumulée en mm (août 2000)* 134
Figure 81 : *Evolution de la fluorescence brute des eaux sans maintenance (sauf nettoyage) et influence d'un simple nettoyage de la cellule* 135
Figure 82 : *Evolution fluorescence brute UV des eaux après un arrêt longue durée (17 jours environ)* 137
Figure 83 : *Evolution de la fluorescence brute UV des eaux après une modification technique sur l'appareil* 139
Figure 84 : *Campagne de recalibration de mai-juin 2001* 141
Figure 85 : *Pourcentage d'erreur du Fluorimètre UV après chaque calibration* 145
Figure 86 : *Evolution de l'indice de fluorescence brute et corrigé linéairement à posteriori* 148
Figure 87 : *Evolution de la fluorescence corrigée des eaux suivant les opérations de maintenance* 149
Figure 88 : *Suivi des concentrations en dioxyde de carbone et oxygène en G1, G2, G3, G4, G5* 150
Figure 89 : *G1 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux* 151
Figure 90 : *G2 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux* 152
Figure 91 : *G3 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux* 152
Figure 92 : *G4 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux* 153
Figure 93 : *G5 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux* 153
Figure 94 : *Corrélation entre CO_2 et température pour le point G4* 154
Figure 95 : *Suivi des températures et de l'humidité de l'air extérieur à 16h et 24h* 155
Figure 96 : *Pluviométrie journalière et cumulée perte des enregistrements entre fin juin et début juillet 2001* 156
Figure 97 : *Evolution de la conductivité dans les piézomètres Pz16 et Pz9 Remarque : L'absence d'enregistrement est due soit à une défaillance des batteries, soit à un retour des sondes en laboratoire pour maintenance* 157
Figure 98 : *Evolution du potentiel rédox (Eh) pour les piézomètres Pz16 et Pz9* 158
Figure 99 : *Saisie des données brutes (table essentielle)* 161
Figure 100 : *Saisie des interventions de maintenance* 162
Figure 101 : *Fond de carte pour la restitution des données* 163
Figure 102 : *Exemple de restitution pour les gaz* 163
Figure 103 : *Foration Odex à l'air comprimé* 242
Figure 104 : *Matériel de perforation* 244
Figure 105 : *Evolution de l'indice de fluorescence dans le temps en fonction du mode de conservation pour les Pz9, Pz18 et Pz19* 275
Figure 106 : *Evolution de la fluorescence en fonction de la température de l'échantillon. Cas d'une conservation à température ambiante dans l'obscurité'* 276

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : *Classement des charbons en fonction de leur teneur en carbone (d'après Teissié, 2001; Tiffon, 1983)* 22
Tableau 2 : *Liste des 16 HAP de l'US-EPA en fonction du nombre de cycles qui les composent, de leur formule chimique et de leur représentation schématique (d'après Barbé, 1997)* 33
Tableau 3 : *Classification cancérigène des différents HAP proposée par : l'Union Européenne (UE), le Centre Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA)* 34
Tableau 4 : *Critères d'appréciation du comportement des polluants organiques (d'après Pellet, 1994)* 36
Tableau 5 : *Propriétés physico-chimiques des benzène, toluène, éthyl-benzène et des xylènes (d'après Gustafson et al, 1997)* 38
Tableau 6 : *Classification cancérigène des différents BTEX proposée par : l'Union Européenne (UE), le Centre Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA)* 38
Tableau 7 : *Valeurs de références et normes concernant certains produits organiques dans l'environnement)* 48
Tableau 8 : *Concentrations en carbone organique dans les sols (% massique par rapport au sol sec)* 50
Tableau 9 : *Résultats des analyses en BTEX d'octobre 1998 dans les eaux de la nappe superficielle* 59
Tableau 10 : *Comparaison des résultats pour les basses eaux* 77
Tableau 11 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour les piézomètres suivis (écart type)* 107
Tableau 12 : *Les résultats de la méthodologie de correction (à noter l'erreur d'étalon du 23 mai : correctif appliqué 270/250=1,08)* 143
Tableau 13 : *Les pourcentages d'erreur d'eaux brutes et de l'étalon standard* 144
Tableau 14 : *Exemple de correction linéaire de flurescence UV entre le 15 mai et le 18 juin 2001 à noter l'égalité de la fluorescence corrigée entre le jour et le lendemain de la calibration* 147
Tableau 15 : *Détail des coûts du projet MCSP* 172
Tableau 16 : *Résultats des analyses de fluorescence en fonction de la température et des conditions de conservation de l'échantillon pour les Pz9, Pz18 et Pz19* 274

TABLE DES PHOTOS

Photo 1 : *Implantation du maillage au théodolite.* 45
Photo 2 : *Excavation de fosses de prélèvements pour l'échantillonnage.* 45
Photo 3 : *Traces de goudrons en surface du site à proximité de Z2.* 45
Photo 4 : *Sondage à la pelle mécanique (goudron liquide à 80 cm de profondeur sur A3).* 45
Photo 5 : *Foration et installation de piézomètres* 51

INTRODUCTION

Ce travail propose une méthodologie d'instrumentation et de surveillance (monitoring) en temps réel et à distance de sites industriels pollués par l'activité charbonnière. La stratégie de mise en place s'est construite autour des polluants présents, des caractéristiques du milieu souterrain et tous les aspects concrets qui en découlent. La gestion et le suivi en temps réel proposent des outils intégrés offrant une visualisation spatiale de l'évolution de la pollution et des paramètres reconnus comme pertinents pour ce type de pollution. L'ensemble constitue un outil à destination des décideurs pour aider à la prise de décision en phase de surveillance ou en phase de dépollution du site.

Dans le domaine des sites et sols pollués, la phase de surveillance réglementaire demande 1 à 2 prélèvements par an pour analyser les teneurs en polluants afin d'estimer l'évolution de l'exposition aux risques. Les investigations sont conduites manuellement par des bureaux d'études assermentés. Le contrôle en continu apporte une complémentarité significative par rapport aux investigations manuelles ponctuelles, en proposant un résultat immédiat et en temps réel. Cela nécessite un équipement spécifique sur site pour prélever et analyser les échantillons, additionné d'un dispositif de traitement et de restitutions des données consultables à distance. La complexité d'un tel dispositif, appelé ici Monitoring Continu, nécessite de conduire une réflexion afin de définir une méthodologie adaptée, réaliste et viable pour les sites pollués. Ces derniers sont environ 3 000 en France selon le recensement national. Parmi ceux ci, la majeure partie doit être gérée en fonction du risque potentiel qu'ils présentent ou pourraient présenter à l'avenir, pour l'homme et l'environnement. Le monitoring continu de site pollué (MCSP) trouve ici toute son utilité : seul un suivi en continu apporte une réponse fiable et représentative de la réelle évolution d'une pollution et donc une meilleure gestion des risques. Actuellement rien n'existe pour les sols contrairement à d'autres domaines comme l'air, les fleuves/rivières où les vitesses des évènements polluants et/ou à risques sont bien supérieures. L'ambition de ce travail est donc de montrer l'intérêt et la faisabilité d'une surveillance en temps réel d'une pollution de sol et de son aquifère associé.

Pour l'application expérimentale, la problématique de la gestion des friches industrielles issues de l'activité charbonnière (cokeries, usines à gaz, etc…) a été retenue car de nombreux sites des régions minières françaises et wallonnes sont concernés. Cet héritage industriel, essentiellement des pollutions aux goudrons, doit aujourd'hui se gérer en terme de risques induits. Une dépollution massive et systématique des sites concernés n'est pas réaliste en terme de coût en raison de l'importance des surfaces polluées. Toutefois, parallèlement au traitement ponctuel de sites stratégiques (urgence, risques importants , réhabilitation nécessaire, etc…), des travaux de recherche sont menés afin de mieux comprendre l'évolution de ces pollutions et ainsi mieux les traiter. Le programme "Monitoring Continu de Site Pollué" s'inscrit dans cette démarche avec pour objectif d'évaluer la représentativité des mesures ponctuelles et de mieux comprendre l'évolution des polluants dans le temps et l'espace, ainsi que leurs réponses à la variabilité des paramètres extérieures (météorologiques, hydrauliques, traitements de sols, etc…). Ces connaissances apporteront aux gestionnaires une meilleure maîtrise des enjeux, et par conséquent, une gestion plus efficace des sites pollués en terme de risque et de coût.

Dans cette logique, le projet de monitoring continu de site pollué propose d'expérimenter sur un site réel (ancienne cokerie représentative des friches minières) une instrumentation et un suivi en continu. La conduite de l'opération est passée par différentes étapes. En premier lieu, des études préliminaires ont été conduites pour connaître l'histoire du site expérimental, distinguer les différentes activités accueillies, connaître sa géologie, son hydrogéologie, les types de polluants présents et leur extension. Ces investigations ont permis de choisir les paramètres à suivre : HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et biogaz principalement. La modélisation (hydrodynamique et transport) du comportement du site a ensuite guidé le choix des points de mesure. En parallèle, les appareils de mesure ont été sélectionnés et l'étude technique de l'instrumentation du site réalisée après consultations d'artisans (électricité, plomberie). Le dispositif de monitoring en continu a alors été réalisé sur site avec une mise en service immédiate après les tests de mise en service. Enfin, un outil intégré de gestion des données ainsi acquises et leurs corrections automatiques offrant une restitution sur un synoptique ergonomique via un SIG (système d'information géographique) a été élaboré. Couplé à un outil de modélisation de transport de polluants et à une base de connaissance des pollutions par goudrons. Cet outil offrira un support adapté d'aide à la décision aux gestionnaires des sites à surveiller concernés.

I. Avant propos

I.1. Politique Nationale Française de traitement et de réhabilitation des sols pollués

Parce ce qu'une pollution d'un sol peut avoir des conséquences variables en fonction des évolutions dans le temps et de l'usage du site, les autorités françaises ont choisi de ne pas définir de normes strictes avec des seuils de concentration à partir desquels un sol et/ou une nappe sont considérés comme pollués et doivent être traités *[HERMINE JP, 2000].* De ce fait, l'approche française s'appuie sur le principe de la proportionnalité entre l'usage du site et le risque potentiel. La contrepartie de ce choix est la nécessité de développer une méthodologie claire et acceptée de tous (autorités, utilisateurs et propriétaires des sites potentiellement pollués) pour l'évaluation et l'appréciation du risque.

Il n'existe donc pas de législation spécifique aux sites contaminés mais une étude de risque au cas par cas par rapport aux utilisations prévues s'impose. Le principal document réglementaire est la circulaire BARNIER du 3 décembre 1993 relative à la gestion et à la réhabilitation des sites pollués *[Classeur "Gestion des sites (potentiellement) pollués" MEDD, 1997 (version 1) et 2000 (version 2)].* Sa finalité est de conduire à la réhabilitation des sites pollués reconnus comme présentant un risque significatif pour la santé et/ou pour l'environnement. La gestion des pollutions se fait sous forme d'obligation d'information lors d'une mutation foncière et de remise en état à la charge de l'exploitant ou du propriétaire (loi du 30 juillet 2003) *[HILLEWAERE, 1998].* Cette démarche, basée sur le principe du pollueur payeur, est inscrite dans le cadre de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Face aux coûts d'une réhabilitation, le principe de prévention de toute pollution devient tacitement obligatoire afin de respecter les contraintes contractuelles (vente, assurance, solvabilité, etc..).

La mise en œuvre de la méthodologie française consiste à *[Guide d'utilisation du classeur, BRGM, 1998 et D. DARMENDRAIL, 1998]* :

- **Recenser** les sites potentiellement pollués : 3 voies complémentaires sont utilisées :
  - ✓ le constat ou la déclaration d'une pollution (accident, découverte fortuite, etc. ...) ;
  - ✓ l'étude systématique des sites en activité notamment pour les secteurs prioritaires (chimie, parachimie, carbochimie, pétrochimie, traitement de surface, fonderie, etc. ...) ;
  - ✓ l'inventaire des sites industriels anciens sur lesquels a été exercée une activité industrielle susceptible d'engendrer une pollution.

Avec 200 000 anciens sites reconnus, 68 000 sites soumis à autorisation et 700 000 sites soumis à déclaration, il n'est pas possible d'intervenir et de mettre en place sur leur ensemble une politique lourde de réhabilitation : il faut "sélectionner".

- **Sélectionner :** le système de sélection fonctionne comme un crible en cascade avec un degré d'investigation technique et scientifique croissant :

- ✓ Prédiagnostic : c'est la première approche de la connaissance du site sur des critères documentaires (historique du site, ancienne étude, etc…) ;
  il permet de définir les sites prioritaires pour les investigations et les éventuelles mesures d'urgence.
- ✓ Diagnostic initial ou étude de sol *: il correspond au recueil d'informations nécessaires à l'évaluation des risques* :
  il comprend l'identification des sources de pollutions potentielles et le constat sommaire de l'impact sur la santé humaine et l'environnement.
- ✓ Evaluation simplifiée des risques (ESR) pour l'homme : elle aboutit à une classification des couples sites/usages en fonction des risques et des dangers pour l'homme en 3 classes :

  les sites de "classe 1" qui nécessitent des investigations complémentaires et une évaluation détaillée des risques (EDR) sur des cibles identifiées (homme, ressources naturelles, faune, flore, etc…) pour orienter la filière de réhabilitation ;

  les sites de "classe 2" ou à surveiller, pour lesquels il sera nécessaire de définir un dispositif de surveillance ;

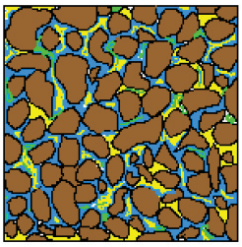
  les sites de "classe 3" ou à banaliser, qui peuvent être rendus à un usage donné.

- **Traiter** : *la réhabilitation est adaptée à chaque couple site/usage.*
  Les principes retenus en France sont basés sur :
  - ✓ la définition d'un site pollué, non pas par rapport à une teneur de polluants, mais par rapport aux risques encourus par l'homme et son environnement ;
  - ✓ la dépollution selon l'usage futur du site étudié ;
  - ✓ la mise en œuvre d'opérations de réhabilitation visant à réduire ou éliminer en priorité les sources primaires de pollution.

I.2. Processus de transferts de pollution dans le sols

Le sol est un milieu hétérogène triphasique constitué :

- ✓ d'air,
- ✓ d'eau
- ✓ du squelette solide



(d'après Pereira, 1997)

En zone saturée, c'est à dire sous le niveau de la nappe, l'air n'est plus présent dans le sol, c'est l'eau qui occupe les vides entre les grains de sol.

Le processus de transfert dans la zone non saturée est favorisé par les précipitations. Le fluide polluant migre d'abord verticalement dans le milieu non saturé entre la surface du sol et la nappe, laissant dans son sillage des terrains imprégnés à une concentration proche de la saturation (Figure 1). Suivant sa volatilité, le polluant a tendance à plus ou moins diffuser dans la phase gazeuse du milieu non saturé.

Une fois la surface piézométrique franchie, la dispersion du soluté se fait à la verticale du foyer de contamination (zone non saturée), puis selon un étalement latéral dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine (zone saturée) comme le montre la Figure 1. La dilution est d'autant plus importante que le débit de la nappe, la vitesse ou la transmissivité sont élevés.<Dans la nappe, l'extension du panache de pollution dépend essentiellement de la direction et de la vitesse d'écoulement de l'eau, mais aussi des caractéristiques du polluant :

- ✓ la viscosité d'un polluant non miscible ,
- ✓ l'adsorption et la désorption sur les particules de la matrice argilo-humique,
- ✓ l'évolution chimique du polluant (dégradabilité).

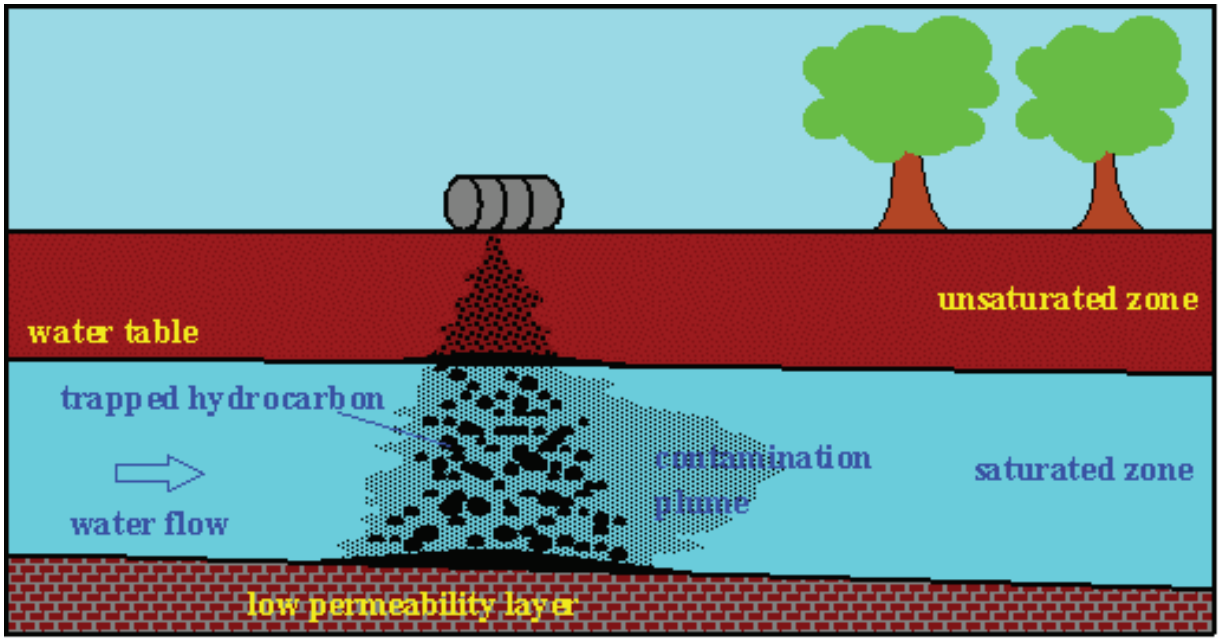


Figure 1: *Processus de transfert de pollution dans le sol (d'après Radilla, 1994)*

I.3. Risques d'une pollution d'un sol

On parle de risques (R) pour les sites et sols pollués lorsque qu'il y a coexistence de (Figure 2) :

- d'une source de pollution (P) ;
- d'un processus de transfert des polluants (T) ;
- d'une cible potentielle (C).

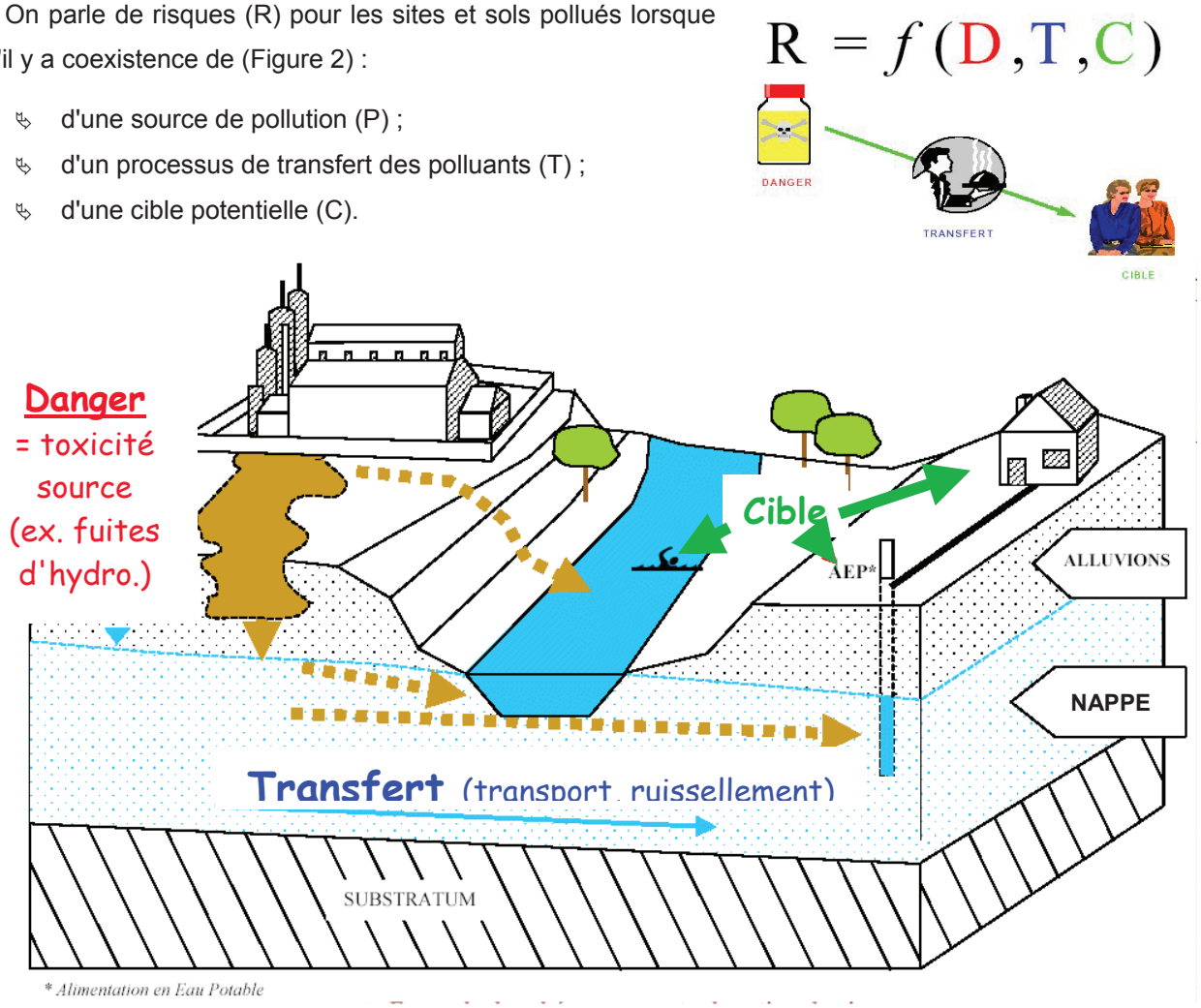


Figure 2 : *Analyses des risques pour les sites et sols pollués*

I.4. Application à la gestion des sites et sols pollués

La synthèse des modalités d'approche pour la plupart des situations rencontrées est présentée sur le logigramme en Figure 3.

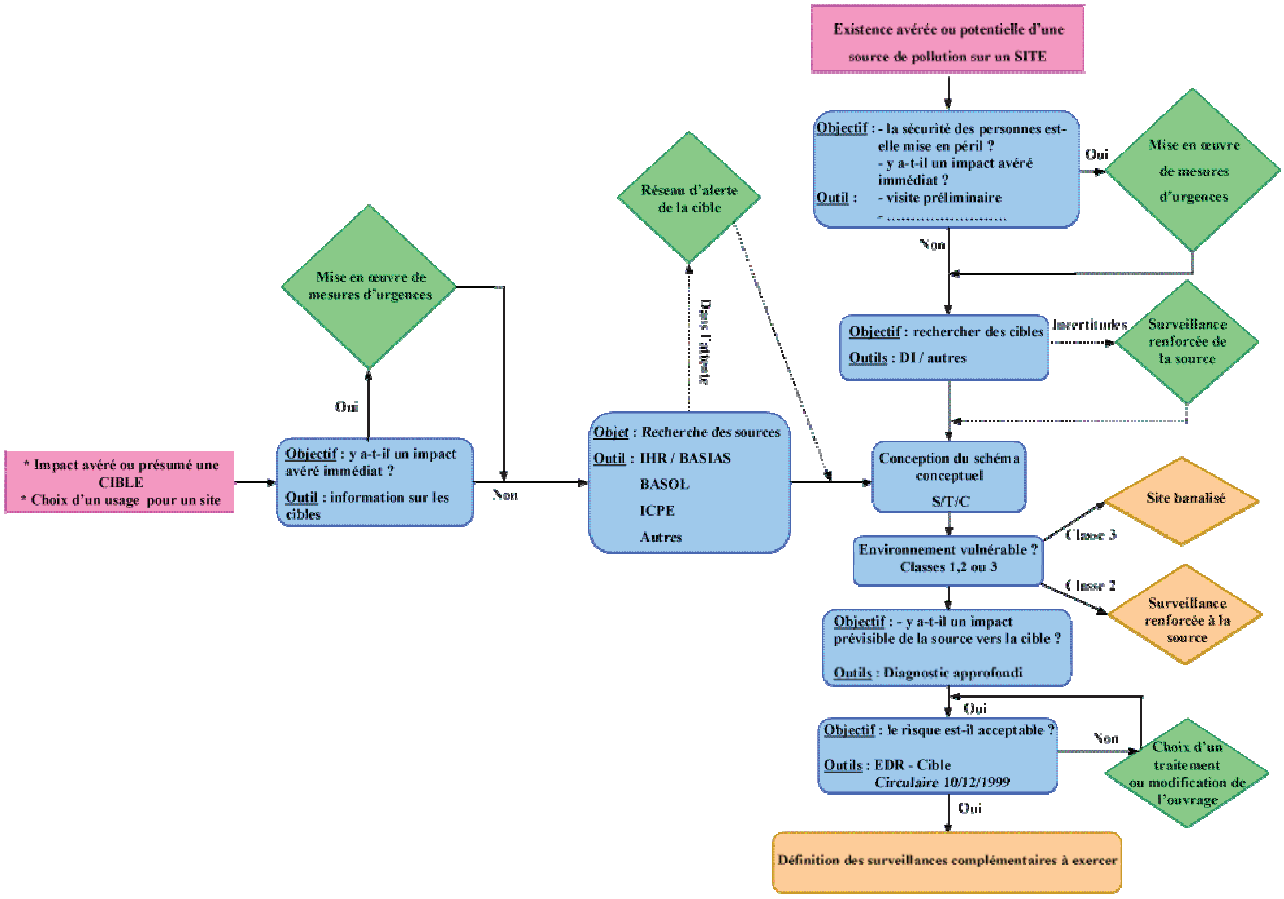


Figure 3 : *Logigramme de gestion des sites potentiellement pollués vis à vis du risque (d'après BRGM).*

Le premier site à avoir expérimenté le Diagnostic Approfondi et l'Etude Détaillée des Risques (EDR) est l'ancienne cokerie de St.-Dizier lors de sa réhabilitation par l'INERIS. Suite à cette étude, la filière de dépollution sélectionnée est un confinement des sols pollués aux HAP par la construction d'une paroi périmétrique étanche enfouie dans le sol, autour des terres polluées (4500 m² de surface) et d'une couverture supérieure à très faible perméabilité (Figure 4). Le site a laissé place à une zone d'activités.

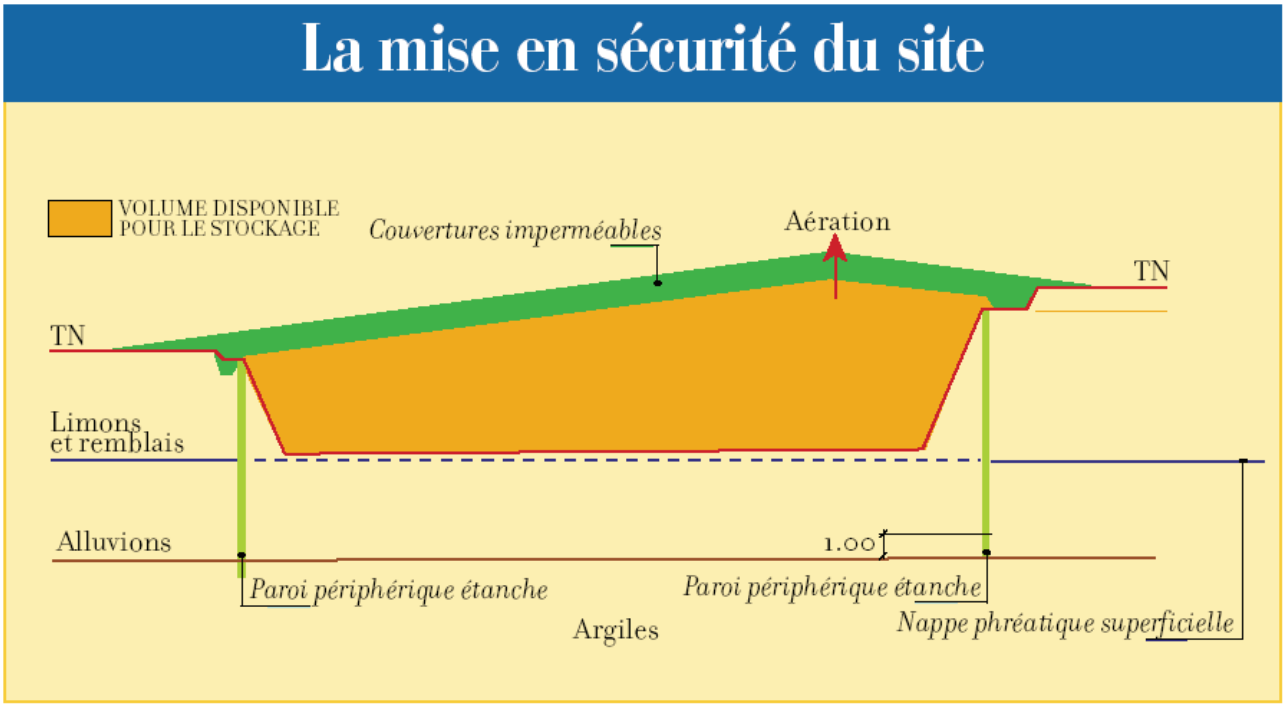


Figure 4 *: Première expérimentation du Diagnostic Approfondi et l'Etude Détaillée des Risques (EDR) avant même que la réglementation soit devenue effective le 12 décembre 1999 : friche de l'ancienne cokerie de Saint-Dizier en Haute Marne [Magazine de l'INERIS n°1, juillet 2000]*

I.5. Problématique

L'application de cette nouvelle politique demande aux propriétaires des sites concernés un suivi plus rigoureux et répétitif (donc plus coûteux) pour apprécier l'évolution du transfert de polluants de leurs sites de classe 2 et même de classe 1 après dépollution pour le suivi du panache de pollution éventuel. De plus la méconnaissance de l'évolution du site entre deux investigations réglementaires généralement pratiquées (comportement non monotone des pollutions) rend le suivi en continu judicieux pour comprendre le comportement réel de la pollution en fonction du temps et de divers paramètres liés au site, aux éléments mitoyens ou aux conditions météorologiques.

La mise au point d'un suivi en continu et automatique de sites pollués présente donc un intérêt certain. Sa généralisation aux sites de même nature permettrait d'offrir un outil adapté pour la surveillance et/ou l'aide à la décision quant aux actions de réhabilitation à entreprendre ou encore dans l'optimisation des traitements de dépollution.

I.6. Recensement des sites pollués

Le recensement des sites pollués Français est en libre accès sur le site Internet du ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD). Il s'agit de :

- La base de données **BASOL** : base de sonnées des sites et sols pollués appelant une action des pouvoirs publics (http://basol.environnement.gouv.fr) en perpétuelle actualisation.
- Un second inventaire complémentaire, **BASIAS** :base de données des anciens sites industriels et d'activités de services (http://basias.brgm.fr) réalisé en partenariat avec le BRGM présente les sites accueillant ou, ayant accueilli, une activité potentiellement polluante.

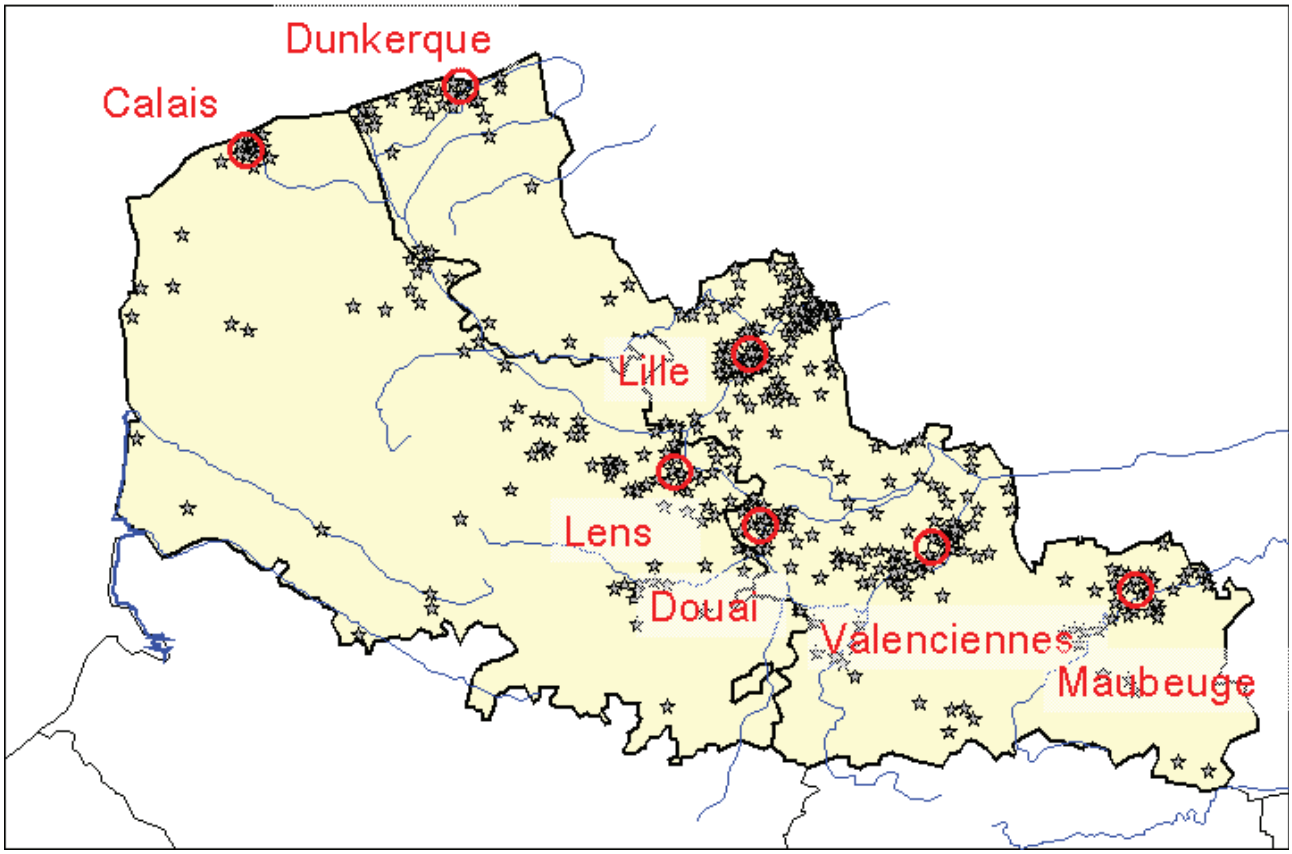


Figure 5 : *Localisation des sites BASOL (d'après DRIRE Nord-Pas-de-Calais)*

L'inventaire BASOL (Figure 5) confirme le passé industriel de la région Nord Pas de Calais avec la plus forte concentration nationale en sites pollués : 400 sites sur environ 3000 recensés au niveau national. L'industrie charbonnière et la sidérurgie ont été le moteur de ce formidable développement économique qui a laissé sa trace dans le paysage et les sols de la région. La carte BASOL de la Figure 5, montre la forte concentration en sites pollués le long du bassin minier Lens-Douai-Valenciennes. L'activité minière se poursuivait jusqu'à Mons en Belgique qui accuse une situation similaire.

L'origine des pollutions constatées provient essentiellement du fonctionnement des installations, avec un impact environnemental fort sur les eaux de la nappe superficielle peu profonde. Les polluants les plus caractéristiques de l'activité charbonnière en général dont les cokeries sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ce type de pollution se prête bien à la surveillance en continu car elles évoluent lentement (sur plusieurs années) laissant ainsi suffisamment de temps au suivi des transferts.

I.7. Industrie charbonnière

Le charbon est une roche sédimentaire provenant de la décomposition (houillification ou carbonification) des végétaux. C'est un combustible constitué essentiellement de carbone (70-95 %), qui a été à la base de la révolution industrielle. Les différents charbons sont (Tableau 1) *[TIFFON, 1983]* : L'anthracite (très bon combustible, avec 95 % de carbone, utilisé dans les foyers domestiques), les houilles (charbon de moindre qualité, entre 70 et 90 % de carbone, utilisé dans l'industrie et pour la fabrication de coke sidérurgique) et les lignites (encore moins performants, avec environ 50 à 60 % de carbone, utilisés sur le lieu d'exploitation pour la production d'électricité).

Tableau 1 : *Classement des charbons en fonction de leur teneur en carbone (d'après Teissié, 2001; Tiffon, 1983)*

Nature			Valeurs limites			Pouvoir calorifique [kJ/kg]	
			Matières volatiles %	Carbone %	Indice de gonflement	Supérieur : (PCS)	Inférieur : (PCI)
Graphite			0 %	pur		38 000	33 300
Charbon	**Anthracite**		3 à 5 %	95 %		35 500	32 600
	Houille	Gras proprement dit	27 à 40 %	75 à 90 %	> 4	36 000	35 120
		Charbon à coke ou gras à coke	22 à 25 %	75 à 90 %	9 très agglutinant	37 000	32 000
		Flambant gras	30 à 40 %	80%	2 à 4	32 600	27 200
		Flambant sec	25 à 50 %	70 %	< 2	27 200	18 800
	Lignite		50 %	50 - 60 %		18 800	14 600
Tourbe			> 75 %	< 50 %		6 300	4 200

Le charbon net, obtenu après criblage du minerai brut, trouve trois utilisations essentielles *[Marc FERRETTI, 1982]* : la combustion directe en chaudière, la gazéification pour la production de gaz combustible (ou la pyrolyse pour la production de coke) et la liquéfaction pour la production de carburants de substitution.

La pyrolyse (ou carbonification) est un chauffage lent en vase clos employée pour la production de coke *[CHARBONNAGE DE FRANCE, 1988].* Ce dernier alimente l'industrie sidérurgique en raison de sa grande capacité calorifique et de son pouvoir réducteur de l'oxyde de fer. L'activité cokière génère également des sous et co-produits (gaz combustibles, goudrons, benzols, ammonium) qui peuvent être valorisés après traitements secondaires.

Les anciens sites de pyrolyse du charbon ont subi une forte pollution en raison des nombreux déversements de benzols (mélange de BTX) et goudrons issus de processus de fabrication *[BRANCHU, 1997].* Il en résulte une contamination du sol (zones saturées et non saturées) en polluants organiques (HAP, BTEX et phénols) et inorganiques (ammonium, ferrocyanures). Certains HAP à 4, 5 et 6 cycles sont considérés comme dangereux car cancérigènes surtout le benzo(a)pyrène. Les BTEX sont des solvants irritants, en particulier le benzène qui présente le plus de danger car fixé par l'organisme. Le phénol peut être mortel à forte dose. Les ferrocyanures et l'ammonium sont présents à l'état naturel mais néfastes pour les organismes vivants en cas de forte concentration.

I.8. Objectif général

L'application de la politique française demande aux exploitants concernés un suivi plus rigoureux de l'évolution de leurs sites de classes 1 et 2, entraînant de nouvelles dépenses en raison des investigations régulières, répétitives voire un éventuel contrôle de l'efficacité du processus de réhabilitation.

Le Monitoring de Site concerne une méthodologie intégrée d'évaluation et de gestion en temps réel de l'évolution de la qualité d'un site en phase de surveillance ou de dépollution. Il offre une solution au problème majeur de la gestion des risques ou des dangers dans le temps et l'espace par rapport aux pollutions industrielles anciennes ou récentes. En systématisant le protocole au moyen d'un outil évolutif, adaptable à différentes configurations hydrogéologiques (zones saturée, non saturée, alluvions, roche fissurée, etc...) et différents types de pollutions (organique, minérale, etc...), il est possible de le rendre économiquement viable grâce à une économie d'échelle en cas de généralisation. En réponse à cette attente, le **CNRSSP** et **l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne (ENSM-SE**) ont entrepris l'élaboration d'une méthodologie et la conception d'un outil. Ce projet de "**Monitoring de Site**", **co-financé par l'ADEME,** fait partie de deux programmes européens :

EUREKA, projet **EMOS** "Environmental Monitoring System", mené en collaboration avec les partenaires suivants : Gruppe Wasser (Autriche), Aquatest (République Tchèque), Charbonnages de France et le CNRSSP (France) ;

INTERREG II (Hainaut / Nord-Pas-de-Calais / Picardie), projet **OCASICHA** "Monitoring de site", mené en collaboration avec l'ISSEP -Wallonie et le CNRSSP.

Le projet est composé de quatre parties permettant de :

- **collecter** en continu sur le site, **stocker** et **transférer** les données correspondant à des paramètres-clefs ;
- **traiter** les données ;
- **modéliser** le fonctionnement du site et son évolution dans le temps en terme d'efficacité du traitement ou de détérioration de la qualité du milieu et comparer les résultats avec les objectifs du gestionnaire ;
- **présenter** l'information de façon claire et ergonomique sur un synoptique (via SIG et base de connaissance), comparer les résultats avec les objectifs du gestionnaire, afin, par exemple, de faciliter la prise de décision au niveau des décideurs.

Le **suivi et le contrôle en temps réel** de sites pollués, tels que développés dans ce projet, pourront avoir les répercussions bénéfiques suivantes à l'avenir :

- ✓ sur la représentativité des données : utilisation d'un Système d'Information Géographique (gestion spatiale) couplé à une base de données mesurées (gestion temporelle) ;
- ✓ en terme de meilleure prise en compte du danger qu'induisent les sites pollués à différentes échelles de temps suivant plusieurs scénarios possibles (interconnexion avec un outil de modélisation), dans le cas de sites pollués à surveiller.
- ✓ en terme de réduction des coûts pour le suivi des sites pollués ;
- ✓ en terme de temps et de coût de traitement dans le cas de sites en cours de réhabilitation grâce à une optimisation du processus mis en œuvre (objectif de "supervision" du procédé de dépollution).

I.9. Objectif spécifique du travail

Le présent travail propose une méthodologie d'instrumentation, de surveillance et de gestion en temps réel de sites pollués. Pour la validation de l'outil, un site expérimental typique de l'industrie charbonnière a été instrumenté en vue de sa surveillance.

Les objectifs recherchés sont :

- **de présenter la démarche retenue** pour l'instrumentation d'une parcelle polluée aux HAP/BTEX ;
- **de définir l'état initial du <u>site d'expérimentation</u>** (ancienne cokerie dans l'Hainaut entre Valenciennes et Mons) à la suite d'une pollution historique en goudrons ;
- **de caractériser son évolution** en vue de l'instrumentation (suivi du transfert des polluants en temps réel) ;
- **d'estimer l'extension spatiale de la pollution** en zone non saturée ainsi que dans la nappe superficielle afin de déterminer les points de prélèvements/analyses adéquats qui permettront d'effectuer un suivi représentatif du site. Dans le but de cette estimation, on utilisera entre autres des outils de modélisation de l'évolution du panache de pollution, tel Feflow®.
- **de présenter les solutions technologiques retenues pour l'instrumentation ;**
- **de réaliser l'instrumentation ;**
- **de suivre l'évolution de la pollution par télé acquisition des mesures *in situ* ;**
- **d'analyser et de présenter les résultats.**

II. Mise en place du Monitoring Continu de Site

II.1. Méthodologie de travail

Ce travail de thèse constitue l'essentiel du projet "Monitoring de Site", fruit d'une collaboration entre le CNRSSP de Douai et l'ENSM-SE. Initiée en 1997, cette thématique de surveillance en continu était initialement portée par Philippe Branchu (chef de projet du CNRSSP) et Frédéric Portet (doctorant de l'ENSM-SE). Courant 1998, Frédéric Portet reprend la conduite du projet (chef de projet + doctorant) pour le mener à son terme, soit la mise en service de l'instrumentation et le début de la surveillance proprement dit. Véronique Milon (responsable de laboratoire du CNRSSP) s'est chargée des travaux d'analyses, et de la maintenance des analyseurs durant la phase de suivi.

Ce rapport de thèse constitue donc le rapport final et complet du projet "Monitoring de Site". Sa structure correspond à la manière dont les opérations ont été conduites, à savoir :

1. Recherche bibliographique sur les analyseurs pour le suivi de sites pollués [Branchu, 1997]
   Il s'agit d'un travail amont réalisé par Philippe Branchu qui dresse un état de l'art sur les analyseurs, Rapport CNRSSP n°97/16.

2. Elaboration d'une méthodologie (Philippe Branchu et Frédéric Portet)
   Travail de réflexion important qui a structuré le projet en explicitant les objectifs et les options retenues.

3. Historique du site expérimental (Philippe Branchu et Frédéric Portet)
   Etude sur documents historiques afin d'identifier les pollutions potentielles, leur localisation et les composés à suivre.

4. Investigations préliminaires (Philippe Branchu et Frédéric Portet)
   Travail destiné à caractériser la pollution du site expérimental ainsi en zone saturée et non saturée. Il s'agit d'une campagne d'échantillonnages des eaux et du sol, d'une série d'analyses en laboratoire puis d'une exploitation des résultats afin de connaître la pollution de surface et diffuse du site expérimental.

5. Etudes hydrogéologiques (Frédéric Portet)
   Travail d'investigation destiné à caractériser la nature des terrains, le fonctionnement hydrodynamique et hydrodispersif du site. Cette modélisation informatique du fonctionnement a succédé aux investigations complémentaires rendues nécessaires pour ajuster les paramètres hydrodynamiques et les conditions aux limites.
   Les résultats ont conduit au choix des points de mesure pour le monitoring .

6. Techniques d'analyses (Frédéric Portet et Véronique Milon)
   Sélection des analyseurs en fonction des composés à suivre et de leurs adéquation avec une surveillance en continu.

7. Conception et travaux d'instrumentation de la parcelle (Frédéric Portet)
   La p*ré-étude et le chiffrage global de l'opération a fourni une vision claire des opérations.*
   Pour les lots techniques (terrassement, énergies, foration, etc…), les consultations et les passations de commandes auprès de sous-traitants ont été conduites en étroite collaboration avec le propriétaire du site qui a dépêché une personne pour le suivi à pied d'œuvre.

La mise en place des analyseurs avec leurs systèmes de prélèvement (pompes, tuyauteries, etc…) et le câblage des appareillages (automatismes, traitement du signal, etc…) ont été réalisés par Frédéric Portet avec l'aide d'une entreprise de plomberie.
Cette phase terrain a constitué la période la plus intense du projet. Outre la technicité employée, il a fallu gérer l'organisation d'un vrai chantier de génie civil avec pas moins de 5 entreprises différentes. Les 3 années d'expérience de Frédéric Portet sur des chantiers de fondations spéciales (tunnels sous marin, parkings sous-terrain, lignes de métro en nappe alluvionnaire) ont été très utiles pour donner la dimension industrielle nécessaire à cette expérimentation.

8. Mise en service du dispositifs (Frédéric Portet)
   La complexité du système a nécessité une batterie d'essais, de nombreux ajustements (techniques et du process), l'établissement des préconisations de maintenance puis un démarrage progressif.

9. Suivi du site (Véronique Milon, Frédéric Portet)
   Durant la phase de suivi, les données ont été récupérées à distance par Frédéric Portet. Véronique Milon a assurée la maintenance régulière de l'installation.

10. Exploitation des résultats

II.2. Pourquoi ? Méthodologie proposée

Si le terme "Monitoring" désigne la surveillance, il ne précise pas la fréquence des analyses. Le suivi en temps réel implique une instrumentation spécifique sur site dotée d'interfaces pour l'acquisition, la télétransmission et la restitution des mesures. On parlera donc ici d'une surveillance en continu ou du "Monitoring continu".

Les sites et sols pollués par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont généralement surveillés, conformément aux dispositions réglementaires en vigueur, aux moyens de campagnes d'investigations ponctuelles (annuelles ou bi-annuelles) qui décrivent le site à différents instants "t" mais ne permettent pas d'apprécier son évolution entre "t" et "t+1". Le Monitoring continu permet de pallier à ce manque d'informations et au défaut de représentativité des analyses généralement pratiquées, grâce à l'appréciation en temps réel de l'évolution de paramètres clés.

Actuellement les applications les plus courantes de Monitoring environnemental en continu concernent les phases gazeuses et/ou liquides avec des fréquences rapides (jour, heure, minute) mais rarement les eaux de nappes polluées en raison des faibles vitesses d'évolution.

A titre d'exemple on peut citer :

- pour la pollution atmosphérique :
  le réseau Français ATMO (constitué de 39 Associations de Surveillance de la Qualité de l'Air)
  géré par l'ADEME sous la coordination du MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE *[ADEME, 2002]*.
  http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/3688/AirInfo03.html#1
- pour la qualité des eaux :
  le concept PLQ 2000 (MEDD-INERIS), acquisition standardisée et polyvalente de données répondant à l'ensemble des besoins des services de l'Eau en terme de Pluviométrie, Limnimétrie et Qualité
  géré par l'INERIS sous la coordination du MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE *[INERIS, 2002]*
  http://www.plq2000.com/

L'expérimentation d'un tel dispositif pour l'eau de nappes polluées par des HAP d'un site réel apporte évidemment une réponse à la multiplication des investigations réglementaires en offrant une meilleure représentativité des analyses. Par extension, un tel dispositif devrait permettre l'appréciation de la variabilité des paramètres et la mise en évidence de facteurs sensibles sur l'évolution globale de la pollution.

Cette information d'un type nouveau apporte une aide supplémentaire pour la gestion de sites similaires hérités de l'activité charbonnière passée en terme de risques induits sur le milieu naturel ou la santé humaine

La méthodologie développée pour la conception du dispositif de suivi en continu est schématisée sur la Figure 6.

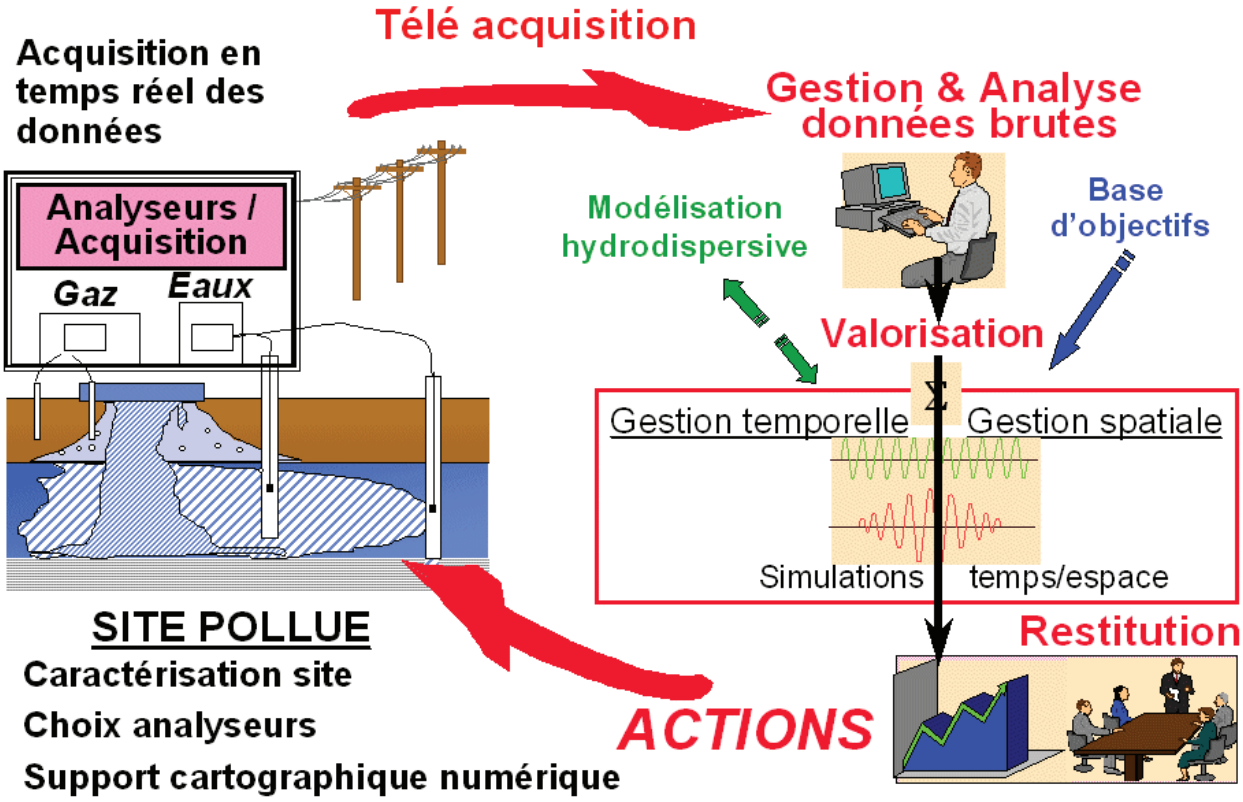


Figure 6 : *Méthodologie du Monitoring Continu de Site Pollué*

II.3. Caractérisation du site expérimental : ancien site de pyrolyse du charbon (cokerie)

L'objectif de ces investigations préliminaires est de cerner les activités passées du site par des études bibliographiques puis, par des investigations sur site, sa géologie, son hydrogéologie, l'origine et le type de pollution ainsi que son extension spatiale. Ces données permettront la sélection des paramètres à retenir pour le suivi en continu.

II.3.1. Principe de fonctionnement d'une cokerie

Le schéma de principe de fonctionnement d'une cokerie est présenté sur la Figure 7. La houille est préparée (broyage, criblage, préséchage et préchauffage) de façon à obtenir une " pâte à coke " qui sera enfournée dans l'unité de production : "les fours à coke". Ces derniers, plus longs (15m) et hauts (7m) que larges (0,5m), sont rassemblés par plusieurs dizaines en batteries. Au bout de 15 à 20 heures de cuisson entre 1100 et 1140°C, on en extrait le "saumon à coke" incandescent qui sera refroidi brutalement par arrosage dans une tour d'extinction pour former le coke.

En sortie des fours à coke, on recueille également des sous produits gazeux à 800°C qui sont refroidis par pulvérisation d'eau dans les condenseurs. Une partie non condensable servira de combustibles et l'autre partie donnera de l'eau chargée en goudrons, benzols et ammonium. Les goudrons seront extraits par décantation (dégoudronnage) puis l'ammonium et les benzols par barbotage dans l'acide sulfurique (atelier sulfate).

Un traitement secondaire (distillation) permet l'extraction de différents sous produits : huiles et braies pour les goudrons, sulfate d'ammonium pour l'ammonium et des hydrocarbures aromatiques de la série des BTX pour les benzols.

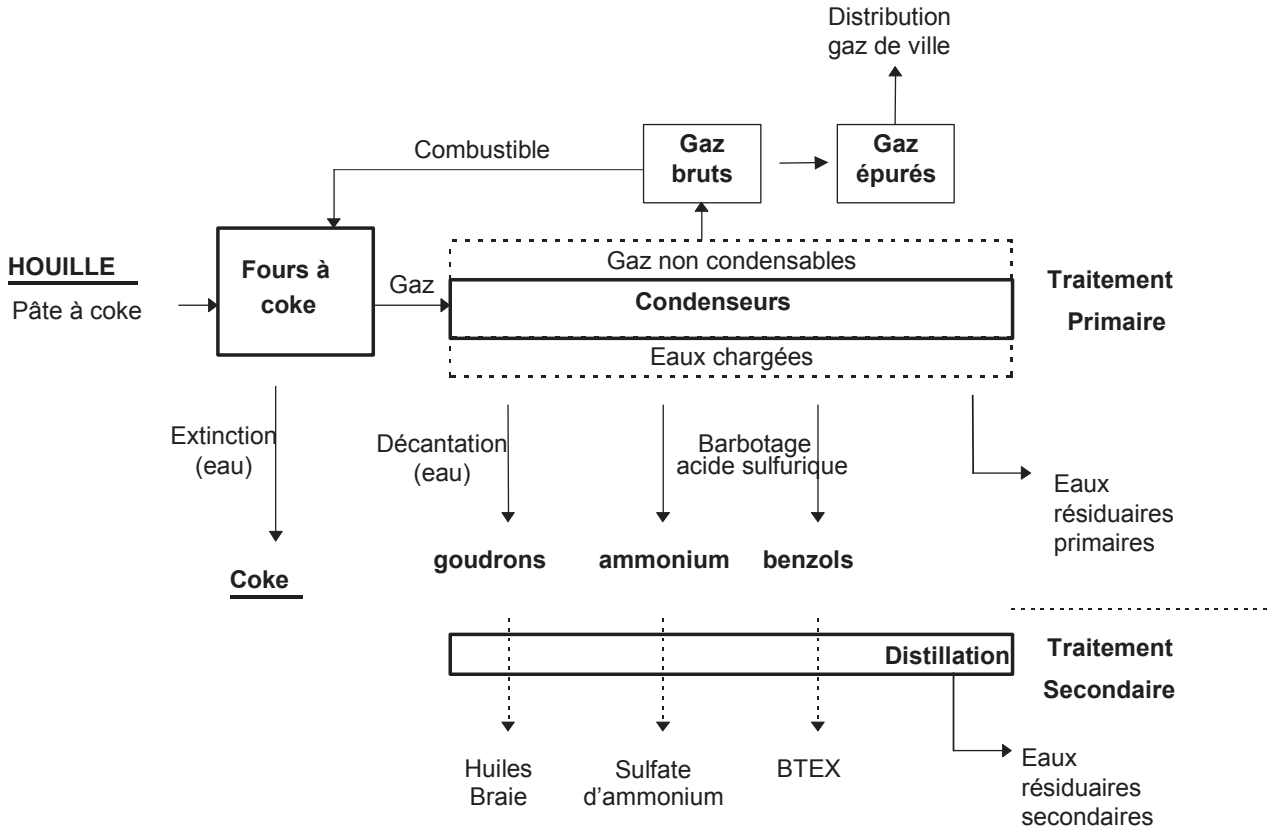


Figure 7 : *Schéma des opérations carbochimiques d'une cokerie*

II.3.2. Localisation des installations sensibles d'une cokerie

Compte tenu de l'implantation des installations de l'ancienne cokerie, plusieurs sources distinctes de pollution potentielles ont été identifiées :

- Fours à coke — *effluents, tous produits issus de la pyrolyse* ;
- Condenseurs des gaz primaires — *effluents tous produits issus de la pyrolyse* ;
- Extracteurs et saturateurs — *goudrons* ;
- Atelier sulfate — *sulfate d'ammonium, BTEX* ;
- Extracteurs et réservoirs à goudrons — *goudrons* ;
- Distillateur phénols et goudrons — *effluents issus des distillations.*

Les ateliers polluants situés autour des fours à coke sont répartis sur l'emprise de la cokerie. Nous considérerons cette zone comme la source originelle de la pollution retenue pour la mise en place du suivi de son transfert dans le sol et la nappe : objet de cette étude.

Figure 8 : *Localisation des ateliers sensibles sur une cokerie (exemple de l'ancienne cokerie de St.-Dizier qui présente une configuration sensiblement identique au site étudié)*

[a] : Four à coke
[b] : Condenseur gaz primaires
[c] : Zone de refroidissement
[d] : Extracteur et réservoir à goudrons
[e] : Distillateur phénols et goudrons

II.3.3. Pollution résiduelle sur les sites d'anciennes cokeries

Les causes de pollution sur un site cokier sont principalement liées à l'écoulement des eaux usées liées au processus de fabrication du coke (extinction du coke, décantation des goudrons, eaux résiduaires) et à l'infiltration des sous- et co-produits issus des traitements primaires et secondaires. A cela s'ajoutent de probables fuites sur les cuves de décantation et le remblaiement de fosses à goudrons pas toujours vidangées lors du démantèlement des installations.

Les polluants généralement présents sont majoritairement issus des **goudrons** et des **benzols**, substances caractéristiques de la production charbonnière.

II.3.3.1. Composition des goudrons

De nature très polluants, les goudrons sont constitués d'un mélange d'hydrocarbures complexes riches en carbone qui comprend des composés oxygénés, sulfurés, azotés basiques et non basiques, et des hydrocarbures lourds.

- ✓ Hydrocarbures *;*
  - hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
  - hydrocarbures aromatiques monocycliques : BTEX (benzène, toluène, ethylbenzène, xylènes), triméthylbenzènes ;
  - hydrocarbures polycycliques ;
  - hydrocarbures saturés ;
  - hydrocarbures non saturés éthyléniques ;
  - hydrocarbures acétyléniques.

- ✓ Composés oxygénés ;
  - eau ;
  - phénols ;
  - acétone.

- ✓ Composés sulfurés (sulfate, sulfure de carbone, sulfhydrate d'ammonium,....) ;
- ✓ Composés azotés (**ammonium**).

II.3.3.2. Composition des benzols

Egalement polluants, les benzols sont essentiellement constitués (75-95%) d'hydrocarbures aromatiques monocycliques de la série du benzène et ses homologues (BTEX). Ils se composent de *:*

- ✓ hydrocarbures aromatiques monocycliques : BTEX ;
- ✓ solvants lourds hydrogénés ;
- ✓ résidus lourds ;
- ✓ impuretés (phénols, cyanures, sulfates...).

II.3.3.3. Risques induits par les polluants d'une pollution cokière

II.3.3.3.1. Les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)

Description des HAP

Les HAP sont des polluants persistants caractéristiques d'une pollution en goudrons (et benzols). L'US-EPA (Environmental Protection Agency) a recensé, en 1978, 16 HAP comme les plus représentatifs des HAP qu'il convient de suivre pour ce type de pollution (Figure 9)

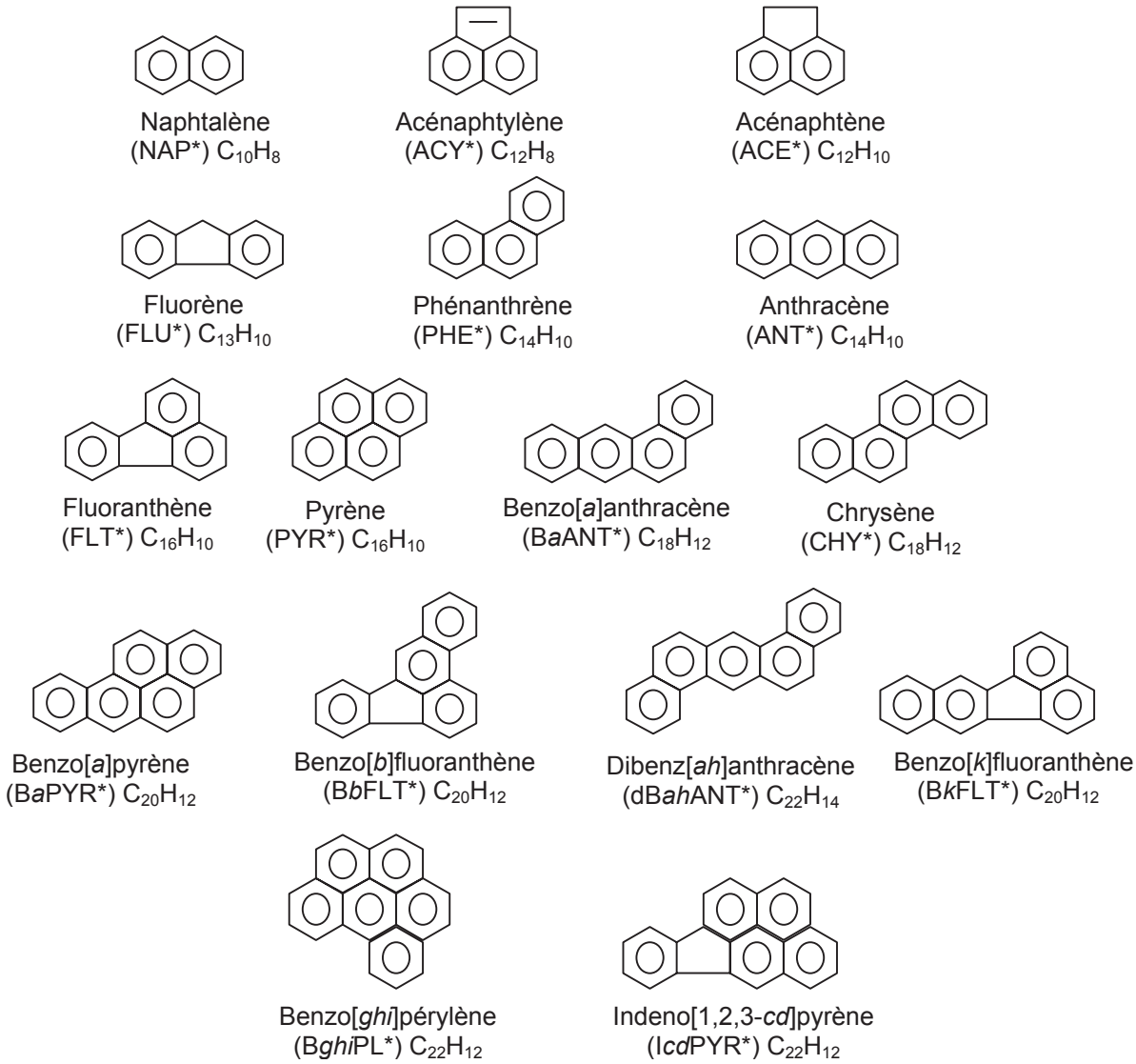


Figure 9 : *Représentation schématique des 16 HAP de l'US-EPA avec formule brute et abréviation des composés (*)*

Ils sont classés en fonction du nombre de cycles qui les composent comme l'indique le Tableau 2 :

Tableau 2 : *Liste des 16 HAP de l'US-EPA en fonction du nombre de cycles qui les composent, de leur formule chimique et de leur représentation schématique (d'après Barbé, 1997)*

Produit	Nb cycles	Formule brute	Masse Molaire (g/mol)	Aspect à la température ambiante
Naphtalène	2	$C_{10}H_8$	128,17	poudre de cristaux blancs; plaquettes monocycliques (recristallisation dans l'alcool éthylique) odeur de « goudron » (seuil 0,3 ppm)
Acénaphtylène	3	$C_{12}H_8$	152,2	prismes (recristallisation dans l'éther) plaquettes (recristallisation dans l'alcool éthylique)
Acénaphtène	3	$C_{12}H_{10}$	154,2	
Fluorène	3	$C_{13}H_{10}$	166,2	écailles blanches (recristallisation dans l'éthanol)
Anthracène	3	$C_{14}H_{10}$	178,2	tablettes ou prismes monocycliques (recristallisation dans l'éthanol) ; coloration jaune avec du vert fluorescent
Phénanthrène	3	$C_{14}H_{10}$	178,2	plaquettes monocycliques (recristallisation dans l'éthanol)
Fluoranthène	4	$C_{16}H_{10}$	202,3	aiguilles ou plaquettes jaunes pâles (recristallisation dans l'éthanol)
Pyrène	4	$C_{16}H_{10}$	202,3	plaquettes jaunes pâles (recristallisation dans le toluène) ; tablettes prismatiques monocycliques avec une fluorescence légèrement bleue (recristallisation dans l'éthanol ou par sublimation)
Benzo(a)anthracène	4	$C_{18}H_{12}$	228,3	plaquettes incolores avec des fluorescences vert-bleu (recristallisation dans l'acide acétique glacial ou l'éthanol)
Chrysène	4	$C_{18}H_{12}$	228,3	plaquettes bipyramidales orthorhombiques (recristallisation dans le benzène) - incolores avec fluorescence bleue
Benzo(a)pyrène	5	$C_{20}H_{12}$	252,3	aiguilles jaunes pâles (recristallisation dans benzène/méthanol); cristaux monocycliques ou orthorhombiques
Benzo(b)fluoranthène	5	$C_{20}H_{12}$	252,3	aiguilles incolores (recristallisation dans le benzène, le toluène ou l'acide acétique glacial)
Dibenz(a,h)anthracène	5	$C_{22}H_{14}$	278,4	cristaux monocycliques ou orthorhombiques incolores
Benzo(k)fluoranthène	5	$C_{20}H_{12}$	252,3h	aiguilles jaunes pâles (recristallisation dans le benzène)
Benzo(g,h,i)pérylène	6	$C_{22}H_{12}$	276,3	larges plaquettes jaunes-verts pâles (recristallisation dans le xylène)
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	6	$C_{22}H_{12}$	276,3	plaquettes ou aiguilles jaunes

Toxicologies des HAP

Le Tableau 3 présente 3 classifications des HAP.

- Pour l'Union Européenne (UE), 6 HAP sont classés comme cancérogènes de catégorie 2 (phrase de risque R45 "peut causer le cancer") dont le benzo(a)pyrène également caractérisé comme toxique pour la reproduction (phrases de risque R 60 "peuvent altérer la fertilité", R 61 "risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant").
- Pour le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), la classification est proche de celle de l'UE avec 6 HAP cancérogènes probables et possibles chez l'homme.
- Pour l'US-EPA, la classification est également proche des 2 précedentes avec 7 HAP cancérogènes probables pour l'homme.

Tableau 3 : *Classification cancérigène des différents HAP proposée par : l'Union Européenne (UE), le Centre Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA)*

Produit	Nb cycles	UE	CIRC / IARC	US-EPA
Naphtalène	2	nc	2B	C
Acénaphtylène	3	nc		D
Acénaphtène	3	nc		
Fluorène	3	nc	3	D
Anthracène	3	nc	3	D
Phénanthrène	3	nc	3	D
Fluoranthène	4	nc	3	D
Pyrène	4	nc	3	D
Benzo(a)anthracène	4	Cat 2 – R 45/60/61	2A	B2
Chrysène	4	Cat 2 – R 45	3	B2
Benzo(a)pyrène	5	Cat 2 – R 45	2A	B2
Benzo(b)fluoranthène	5	Cat 2 – R 45	2B	B2
Dibenz(a,h)anthracène	5	Cat 2 – R 45	nc	B2
Benzo(k)fluoranthène	5	Cat 2 – R 45	2B	B2
Benzo(g,h,i)pérylène	6	nc	3	D
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	6	nd	2B	B2

(nc : non cancérigène, nd : non déterminé)

Classification de l'Union Européenne (JOCE L110A du 04/05/1993) :

Catégorie 1 : substances que l'on sait être cancérigènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour établir l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à de telles substances et l'apparition d'un cancer.

Catégorie 2 : substances devant être assimilées à des substances cancérigènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour justifier une forte présomption que l'exposition de l'homme à de telles substances peut provoquer un cancer. Cette présomption est généralement fondée, 1) sur des études appropriées à long terme sur l'animal, 2) sur d'autres informations appropriées.

Catégorie 3 : substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérigènes possibles mais pour lesquelles les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante. Il existe des informations issues d'études adéquates sur les animaux, mais elles sont insuffisantes pour classer la substance dans la deuxième catégorie.

Classification du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC/IARC/OMS) :

Groupe 1 : l'agent (ou le mélange) est cancérigène pour l'homme. Les circonstances d'exposition donnent lieu à des expositions qui sont cancérigènes pour l'homme

Groupe 2A : l'agent (ou le mélange) est probablement cancérigène pour l'homme. Il existe des indices limités de cancérogénicité chez l'homme et des indices suffisants de cancérogénicité pour l'animal de laboratoire. Les circonstances d'exposition donnent lieu à des expositions qui sont probablement cancérigènes pour l'homme

Groupe 2B : l'agent (ou le mélange) pourrait être cancérigène pour l'homme. Les circonstances d'exposition donnent lieu à des expositions qui sont possiblement cancérigènes pour l'homme

Groupe 3 : l'agent (ou le mélange) ne peut être classé pour sa cancérogénicité pour l'homme.

Groupe 4 : l'agent (ou le mélange) n'est probablement pas cancérigène pour l'homme.

Classification de l'Agence américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA) :

Classe A : substance cancérigène pour l'homme.

Classe B1 : substance probablement cancérigène pour l'homme. Des données limitées chez l'homme sont disponibles.

Classe B2 : substance probablement cancérigène pour l'homme. Il existe des preuves suffisantes chez l'animal et des preuves non adéquates ou pas de preuve chez l'homme.
Classe C : cancérigène possible pour l'homme.
Classe D : substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.
Classe E : substance pour laquelle il existe des preuves de non cancérogénicité pour l'homme.

Phase de risque : *Extrait de l'arrêté du 20 avril 1994 relatif à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances, (JO du 8 mai 1994)*

R 45 : peut causer le cancer ;
R 46 : peut causer des altérations génétiques héréditaires ;
R 60 : peut altérer la fertilité ;
R 61 : risque pendant t la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.

Les HAP sont absorbés au niveau des poumons, des voies digestives et par la voie percutanée *[INERIS, 2000; OMS/IPCS, 1998]*. Parmi les 16 HAP des l'US-EPA, sept peuvent donc être considérés comme dangereux pour l'homme en terme de cancérogénicité :

- ✓ Benzo(a)anthracène ;
- ✓ Chrysène ;
- ✓ Benzo(a)pyrène ;
- ✓ Benzo(b)fluoranthène ;
- ✓ Dibenz(a,h)anthracène ;
- ✓ Benzo(k)fluoranthène ;
- ✓ Indéno(1,2,3-cd)pyrène.

Toutefois, le Benzo(a)pyrène est le plus dangereux des 16 HAP de l'US-EPA car outre son aspect cancérigène; il est le seul a présenter une toxicité pour la reproduction (fertilité et développement de l'enfant). Une description sur la toxicologie des HAP est présentée en Annexe 1.

Il n'existe pas de réglementation officielle en ce sens, mais il est admis d'utiliser un Facteur d'Equivalence Toxique (FET) pour évaluer le potentiel cancérogène d'un mélange de HAP. La puissance cancérogène d'un HAP est évaluée par rapport au cancérogène de référence qu'est le benzo(a)pyrène, auquel est affecté un poids 1. D'autres sont affectés d'un poids 0,1 ou 0,01 ou 0,001. La classification utilisée est celle de Nisbet et Lagoy

Caractéristiques et mode de transfert des HAP

Les HAP ont tous des caractéristiques communes *[BOUCHEZ, 1996; PELLET, 1994; INERIS, 2003*] (Annexe 2). Selon les critères de comportement généralement utilisés *[PELLET, 1994]* (Tableau 4), ils sont fortement adsorbés sur les matrices solides organiques, non volatils, quasi insolubles dans l'eau et plus denses que cette dernière. Deux exceptions à cette règle : le naphtalène qui présente une solubilité et une volatilité plus forte et l'acénaphtylène qui est moins dense que l'eau (Annexe 2).

Tableau 4 : *Critères d'appréciation du comportement des polluants organiques (d'après Pellet, 1994)*

Paramètre	Symbole	Unité	Critères (à 20 - 25 °C)	Interprétation
SOLUBILISATION				
Solubilité dans l'eau	S	mg/l	S < 10 10 < S < 10 000 S > 10 000	=> insoluble à peu soluble => peu soluble à soluble => soluble à très soluble
VOLATILISATION				
Pression de vapeur saturante	P_v	Pa	P_v < 133 P_v > 133	=> non volatil => volatil
Point d'ébullition	Te	° C	Te < 80 80 < Te < 200 Te > 200	*indicatif*
Constante de Henry	k_H	$Pa.m^3/mol$	k_H < 100 100 < k_H < 500 k_H > 500	=> faiblement volatil => volatil => très volatil
MIGRATION VERTICALE DES VAPEURS				
Densité par rapport à l'air	d_v	(d_{air} = 1)	d_v < 1 d_v > 1	=> mouvement ascendant => accumulation en surface de nappe
MIGRATION VERTICALE DU FLUIDE				
Densité par rapport à l'eau	d_l	(d_{eau} = 1)	d_l < 1 d_l > 1	=> flottant au toit de la nappe => écoulement vertical
Viscosité	μ	Centipoise (cP)	μ < 0,9 0,9 < μ < 2 μ > 2	=> plus fluide que l'eau => fluidité de l'eau => fluidité de l'huile ou moindre
PIEGEAGE (PAR ADSORPTION) DANS LA PHASE SOLIDE				
Coefficient de partage octanol/eau; carbone organique /eau	$K_{ow/oc}$	log $K_{ow/oc}$	log $K_{ow/oc}$ < 2 2 < log $K_{ow/oc}$ < 4 log $K_{ow/oc}$ > 4	=> composé « hydrophile », reste avec l'eau => « hydrophile » à « hydrophobe » => composé « hydrophobe », se fixe sur phase solide

Leur comportement dans le sol est illustré sur la Figure 10.

Cela se traduit, au niveau de leur mobilité, par un écoulement vertical de la phase liquide, à travers la zone non saturée et l'aquifère, diminuée par l'adsorption d'une partie du produit sur la matrice organique du sol. Les HAP sont des composés très stables, seuls l'anthracène, le benzo(a)pyrène et le dibenzo(a,h)anthracène sont sujets à des réactions de photo-oxydation ne pouvant se réaliser dans les sols en raison de l'absence de lumière.

Il convient de différencier les HAP à 2-3 cycles des autres HAP plus lourds. Les premiers, constituent la majorité des HAP produits lors de la carbonisation de la houille. Ils migrent plus facilement et sont les seuls à subir une biodégradation naturelle..

L'institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) propose une descritpion précise des HAP et de leur comportement dans des fiches de données toxicologiques et environnementales par produits (http://www.ineris.fr/recherches/fiches/fiches.htm).

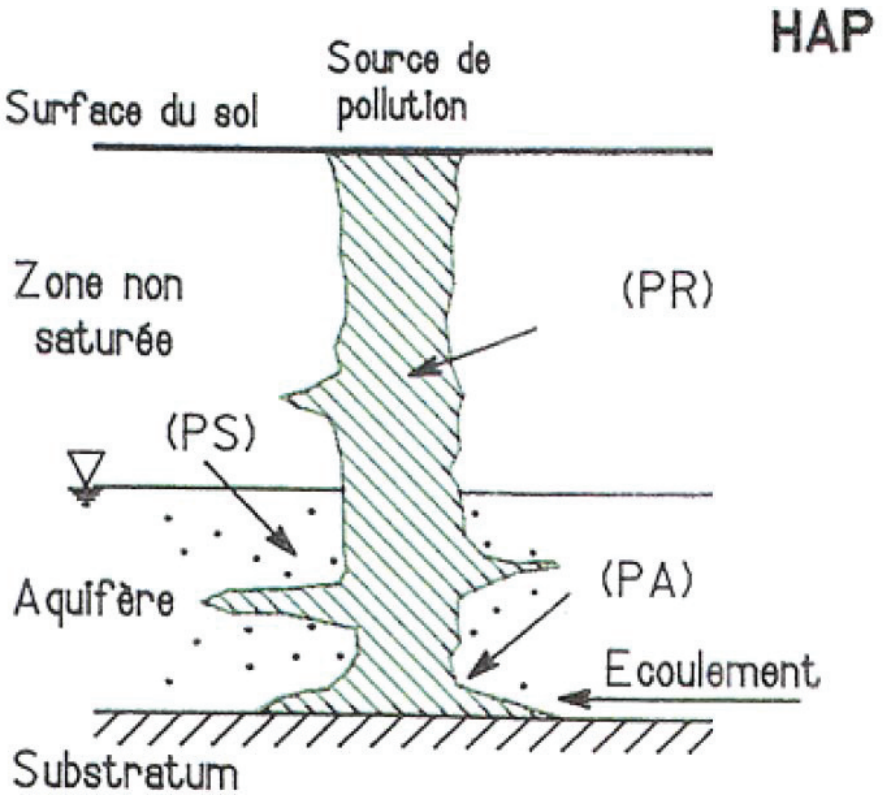


Figure 10 : *Représentation schématique du comportement de différents composés organiques dans le sol : HAP (d'après Pellet, 1994)*
(PR) : phase résiduelle, (PS) : phase soluble, (PA) : phase d'accumulation

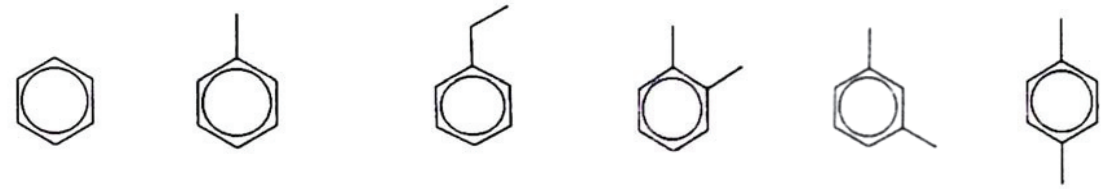
Cibles

Concernant les sites et sols pollués, la principale source d'exposition des populations aux HAP est la ressource en eau (alimentation, baignade). L'exposition concernera donc un mélange de HAP et ceci quelle que soit la voie d'exposition (orale ou cutanée).

II.3.3.3.2. Les BTEX

Description des BTEX

Les BTEX sont des composés aromatiques volatils (CAV) voisins des composés organiques volatils (COV). L'acronyme BTEX est formé des initiales des CAV les plus usuels : benzène, toluène, éthyl-benzène et xylènes (m, o et p). Il s'agit d'hydrocarbures aromatiques monocycliques qui représentent 75 à 95 % des benzols (sous produits de la pyrolyse du charbon), donc caractéristiques d'une pollution au charbon..:



benzène *toluène* *éthyl-benzène* *m-xylène* *o-xylène* *p-xylène*

Figure 11 : *Structure chimique des BTEX (d'après Lide, 1997)*

Tableau 5 : *Propriétés physico-chimiques des benzène, toluène, éthyl-benzène et des xylènes (d'après Gustafson et al, 1997)*

Composés	Poids moléculaire (g/mol)	Solubilité dans l'eau à 20°C (mg/L)	LogKow	LogKoc	Constante de Henry ($Pa.m^3/mol$)	Tension de vapeur à 25°C (Pa)	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)
Benzène	78,11	1780	2,13	1,91	557	12666	6	80,1
Toluène	92,13	515	2,69	1,37	678	3800	-95	110,6
Ethyl-benzène	106,2	152	3,13	1,73	886	1267	-95	136,2
m-xylène	106,2	160	3,20	1,79	730	1104	-47	139
o-xylène	106,2	220	3,15	1,75	565	1165	-25	144
p-xylène	106,2	215	3,18	1,77	577	1165	13	138

Toxicologie des BTEX

Le Tableau 6 présente 3 classifications des BTEX : pour l'Union Européenne (UE), seul le benzène est classé comme cancérogène de catégorie 2 (phrase de risque R45 "peut causer le cancer"). Les classifications de l'CIRC et de l'US-EPA le confirme également.

Tableau 6 : *Classification cancérigène des différents BTEX proposée par : l'Union Européenne (UE), le Centre Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA)*

Produit	UE	CIRC / IARC	US-EPA
Benzène	Cat1 – R 45	1	A
Toluène	nd	3	D
Ethylbenzène	nd	2B	D
o-, m-, p-xylènes	nd	3	D

(nc : non cancérigène, nd : non déterminé)
(Critères de classification sous le Tableau 3)

Les BTEX sont des composés chimiques assez nocifs, notamment le benzène qui est considéré comme étant un produit cancérigène et neurotoxique *[STEYER, 1999].*

Le benzène est une des substances organiques qui présente le plus de danger *[BRANCHU,1997]* : son inhalation peut être la cause d'anémies, de leucopénies et de thrombopénies. Les xylènes sont des solvants qui détruisent les muqueuses. Ils provoquent des irritations nasales, des bronchites, et des lésions rénales. Le toluène est également un solvant irritant pouvant engendrer fatigue, insomnies, nervosité, amaigrissement et des troubles neuro-comportementaux.

Caractéristiques et mode de transfert des BTEX

Les BTEX sont volatils, faiblement persistants et circulent sous la double forme liquide et vapeur dans la porosité du sol Les principales voies de propagation et de dégradation de ces composés sont la volatilisation, l'écoulement et la biodégradation. Cette dernière se produit rapidement dans les zones aérobies du sol.

D'après les critères de comportement utilisés (Tableau 4) *[PELLET, 1994],* les BTEX sont "moyennement" adsorbés (2 <Log K_{oc}< 3) sur la matrice solide, fortement volatils surtout le benzène (80 °C < Te < 145 °C et P_u > 200 Pa), peu solubles dans l'eau (le benzène est le plus soluble avec une solubilité dans l'eau de : S = 1 830 mg/l), moins denses que l'eau et plus denses que l'air en phase gazeuse *[MEDD "Guide du comportement des polluants dans les sols et les nappe", 2001; INERIS, 2003].*

Comme le montre la Figure 11, il y a une accumulation de BTEX au toit de la nappe en phase liquide avec un cône d'imprégnation et une accumulation des vapeurs en surface de nappe.

Les BTEX sont susceptibles d'être dégradés en présence d'oxygène, pouvant ainsi disparaître naturellement après quelques dizaines d'années.

Comme pour les HAP, l'INERIS propose une description précise des BTEX et de leur comportement dans des fiches de données toxicologiques et environnementales par produits (http://www.ineris.fr/recherches/fiches/fiches.htm).

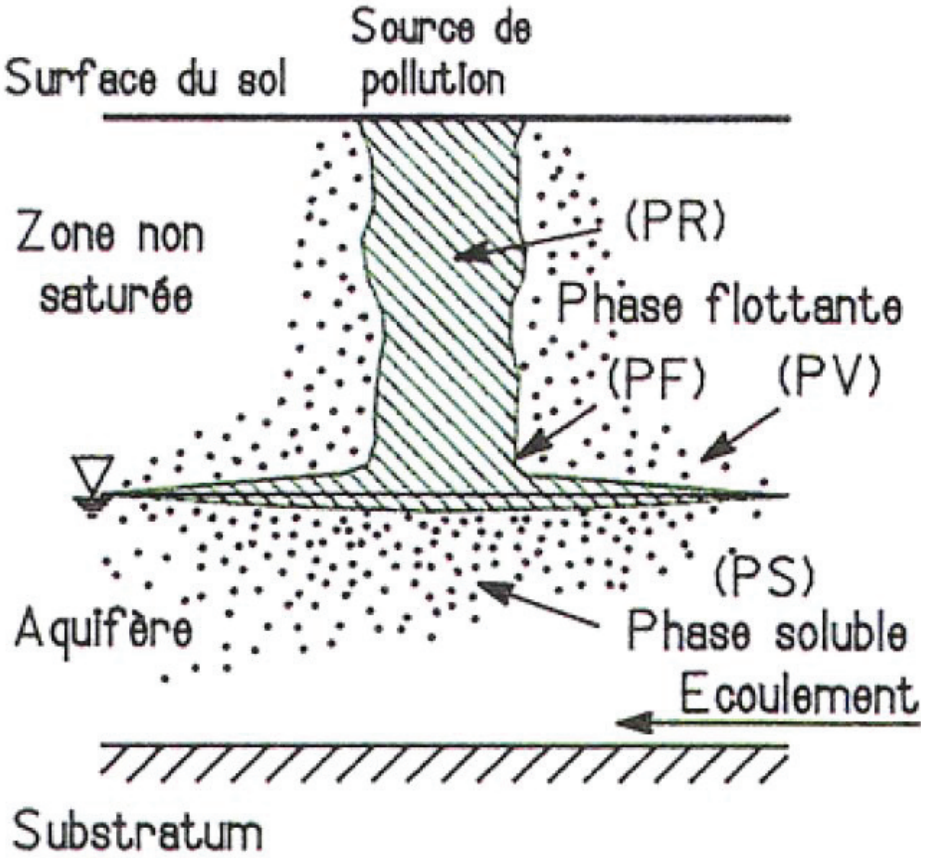


Figure 12 : *Représentation schématique du comportement de différents composés organiques dans le sol : HAP (d'après Pellet, 1994)*
(PR) : phase résiduelle, (PS) : phase soluble, (PA) : phase d'accumulation, (PV) : phase volatile

Cible

Comme pour les HAP, les BTEX sont des polluants des sols qui menacent directement la ressource en eau et donc les populations (alimentation, baignade). Toutefois ici, le caractère volatil des composés génère des dégagements gazeux dans la zone non saturée et à la surface du sol pollué particulièrement important lorsque le sol est remobilisé (excavation). Les populations seront exposées par voie oral, cutanée et également olfactive.

II.3.3.3.3. Ammonium

Description de l'ammonium

L'ion ammonium NH_4^+ fait partie d'une chaîne complexe de réactions d'oxydoréduction catalysées par les micro-organismes du sol. Ces réactions vont influencer son mode de présence : phase gazeuse (NH_3, N_2, N_2O, NO) ou phase dissoute (NH_4^+, NH_3aq, NO_2^-, NO_3^-). De plus, NH_4^+ est retenu dans le sol par échange ionique sur les minéraux argileux.

Toxicologie de l'ammonium

L'ion ammonium n'est pas toxique en lui-même. Par contre l'ammoniaque (NH_3 aq) avec lequel il est en équilibre est très toxique pour la faune piscicole. L'ammonium a également une toxicité indirecte par le fait qu'il peut se transformer en nitrite qui provoque des troubles chez les nourrissons.

Caractéristiques et mode de transfert de l'ammonium

En condition aérobie, il se produit un processus de nitrification (oxydation de l'azote organique par l'intermédiaire de micro - organismes autotrophes) qui donne des nitrites (NO_2^-), puis des nitrates (NO_3^-) qui migrent vers les nappes.

La dénitrification s'opère en anoxie via une réduction des nitrates en N_2 par les micro-organismes hétérotrophes (qui décomposent la matière organique).

Cible

Comme pour les HAP, une pollution des sols par l'ammonium menace directement la ressource en eau (alimentation,. Les populations seront exposées par voie orale.

En conclusion, les principaux polluants à rechercher pour des sites pollués aux goudrons, sont:

- ✓ les **HAP** et **BTEX** pour les composés organiques ;
- ✓ et essentiellement **l'ammonium** pour les composés inorganiques

II.3.4. Mise en situation

Le site mis à disposition pour les essais et la validation de l'outil est une friche de cokerie du valenciennois (Nord) ayant servi à la pyrolyse du charbon entre 1906 et 1955 (Annexe 3). Toutes les installations ont été démantelées en 1970.

Ce site d'environ 1 km², présenté sur la Figure 13, est délimité :

- au nord-ouest par un canal à grand gabarit ;
- au nord-est et au sud-est par une route départementale ;
- au sud-ouest par une usine métallurgique.

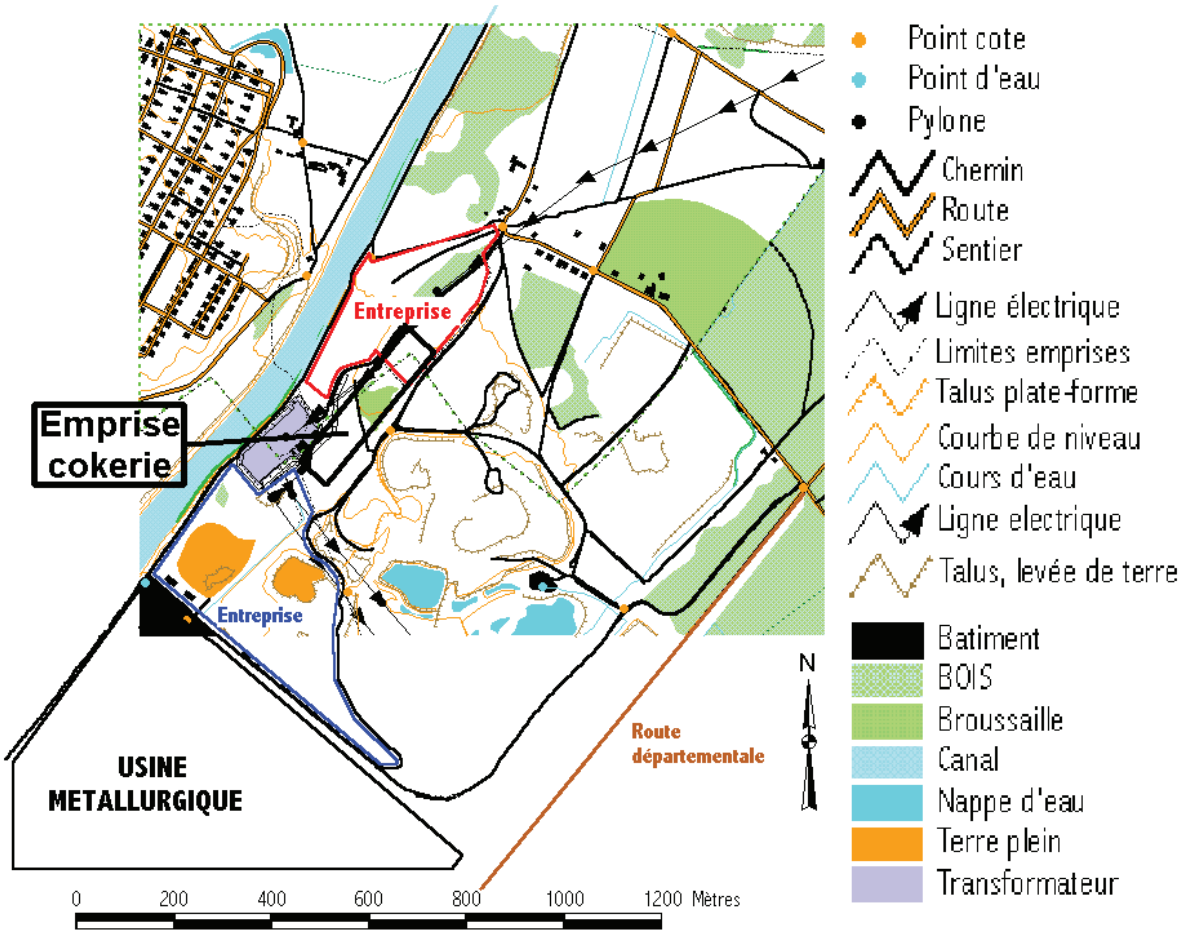


Figure 13 *: Mise en situation du site expérimental (BD Topo © de l'IGN sous SIG Arcview ©)*

Il est à noter qu'une surface a été rétrocédée à deux entreprises spécialisées dans le traitement de matériaux : angle ouest, angle nord et berge droite du canal à grand gabarit (Figure 13 "entreprise").

Ce site présente l'avantage d'avoir une superficie restreinte, et surtout, n'a jamais été réutilisée pour une activité polluante depuis l'arrêt de la cokerie et le démantèlement des installations. On se trouve donc avec un schéma relativement simple d'une pollution historique dont l'étendue peut être déterminée par des investigations sur site. Cependant la pollution peut évoluer au cours du temps par bio-atténuation ou bio-transformation au cours du temps.

II.3.5. Géologie du site

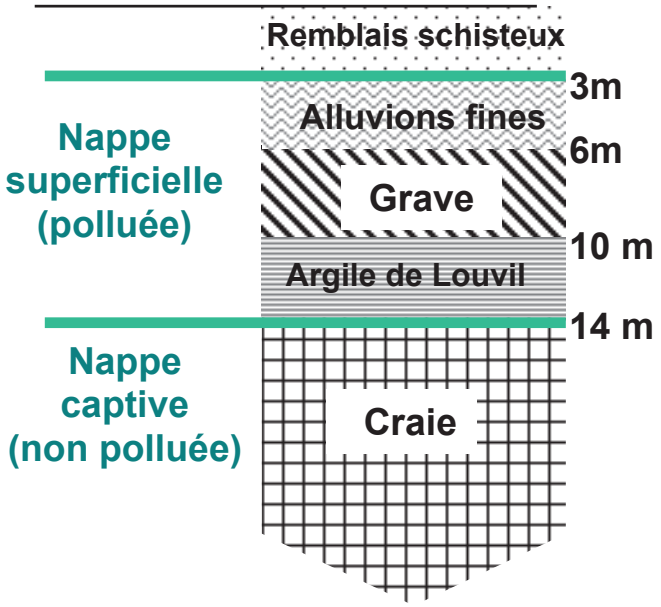


Figure 14 : *Coupe hydrogéologique type du site*

Le site se trouve dans une plaine alluviale sur la berge droite du canal à grand gabarit de (12 m de largeur pour 4 m de tirant d'eau). Depuis sa surface, le terrain est décomposé successivement de (Figure 14) :

- 3 m de remblais (schiste, sable et limons) ;
- 3 m d'alluvions fins (sable, limons et tourbe) ;
- 4 m de grave ;
- 4 m d'argile de Louvil (substratum) ;
- puis une formation crayeuse à partir de 14 m de profondeur.

On trouve deux types d'eaux souterraines : l'eau de subsurface (nappe superficielle) et les eaux profondes (nappe captive) sous le substratum, soit deux aquifères différents. La nappe superficielle, de type semi-captive, est directement alimentée par l'infiltration des eaux de surface (précipitations, déversements, etc...), donc vulnérable aux pollutions. La nappe profonde (nappe captive de la craie) est alimentée par des zones d'affleurement de la craie situées à quelques dizaines de kilomètres au sud et à l'est *[carte géologique St.-Amand Crespin Mons, 1973]*.

Une carte schématique en Annexe 4 indique les emplacements des piézomètres du site.

II.4. Caractérisation de la pollution des sols du site expérimental (pollution de surface)

II.4.1. Campagne d'échantillonnage des sols (juin 1998)

Le sous-sol d'une friche industrielle est généralement très hétérogène quant à la distribution de ses constituants et à la répartition des pollutions potentielles qu'il peut contenir *[WAVRER, 1997 et 1998]* : les sols ont subi d'importants remaniements et il existe de nombreuses structures génie civils enterrées (anciennes fondations). Définir l'état de pollution d'un tel site nécessite la réalisation d'investigations adaptées avec la stratégie d'échantillonnage et une méthode de prélèvement éprouvées.

Le projet "méthodologie d'investigations des sites et sols pollués" conduit par le CNRSSP a mis en évidence *[WAVRER, 1997 et 1998]* la variabilité spatiale horizontale des concentrations mesurées en HAP sur le site d'une ancienne cokerie, échantillonné de façon systématique selon un maillage carré régulier de 20 mètres de côté. Une nouvelle étude de la répartition de la pollution, en adoptant un pas d'échantillonnage plus serré (5 mètres) pour apprécier l'homogénéité du site, a abouti aux même conclusions à savoir une hétérogénéité de la répartition de la pollution aussi bien en surface qu'en profondeur *[SZCZEPSKI, 2000]*. Le resserrage de la maille d'échantillonnage n'élimine donc pas le problème de l'hétérogénéité du site, mais apporte des informations supplémentaires sur la répartition de la pollution. Réduire encore le pas d'échantillonnage permettrait d'obtenir une répartition de la pollution encore plus près de la réalité, mais au prix d'une forte augmentation du nombre de points de prélèvement et donc d'un surcoût important par rapport au budget initial alloué à la phase d'investigation du site.

Afin d'identifier certaines sources de pollution du site expérimental, il a été retenu un échantillonnage systématique selon un maillage carré régulier de 30 mètres limité à l'emprise de la cokerie, lieu des déversements potentiels (cadre noir "emprise cokerie" Figure 13*)*. Le reste du site ne sera pas échantillonné. Avec une pollution historique vieille de 50 ans dont l'emprise spatiale de la cokerie dépasse les 80 000 m² (400 m x 200 m), cette dimension de la maille (30 m x 30 m) génère une campagne d'échantillonnage des sols relativement lourde. En contre partie, cela permettra une vision globale de la répartition spatiale de la pollution de surface et l'identification des sources de pollution. Chaque nœud de maille correspondra à la réalisation d'une fosse de prélèvement effectués à l'aide d'une pelle mécanique sur une profondeur de 5 m, soit un total d'une centaine d'échantillons.

La position du maillage a été déterminée d'après l'étude de plans d'archives (Annexe 3) de manière à ce qu'il soit positionné sur l'emplacement des fours à coke (Figure 15), avec pour direction l'axe de l'ancienne usine, tout en tenant compte des exigences du terrain (emprises industrielles). A la fin du piquetage, les jalons ont été repérés au GPS afin d'enregistrer leur position exacte et de les intégrer sous Arcview ©. Les nœuds de mailles sont indicés par ligne (Z, A, B, C, D, E, F, G, H et I) et numérotés par colonne (1, 2, 3, 4, et 6).

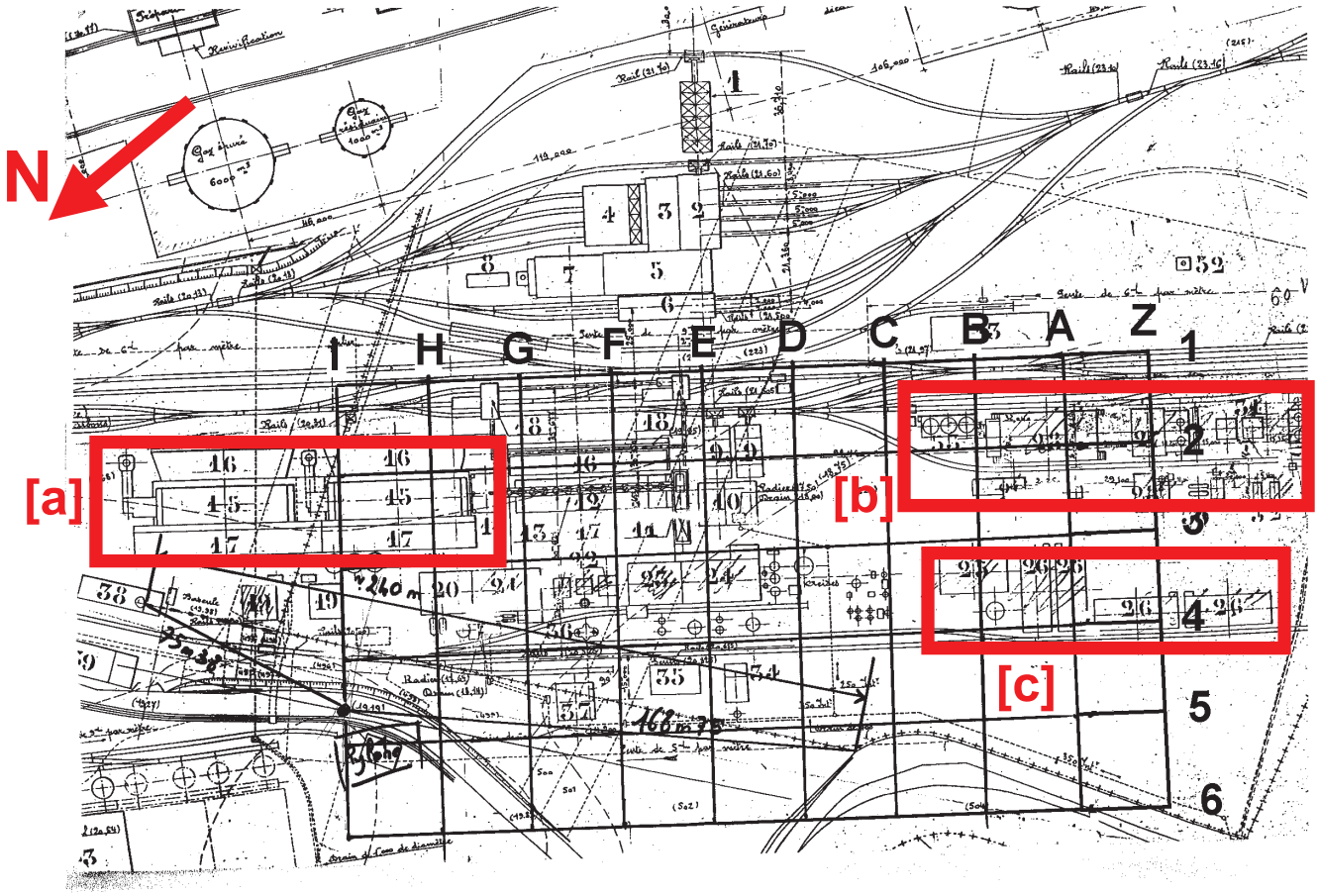


Figure 15 *: Représentation du maillage sur le plan d'ensemble de la cokerie superposé au plan d'ensemble de la cokerie de 1924*

[a] : Emplacement des anciens fours à coke ;

[b] : Extracteurs et réservoirs à goudrons ;

[c] : Atelier distillation goudrons.

Photo 1 : *Implantation du maillage au théodolite.*

Photo 2 : *Excavation de fosses de prélèvements pour l'échantillonnage.*

Photo 3 : *Traces de goudrons en surface du site à proximité de Z2.*

Photo 4 : *Sondage à la pelle mécanique (goudron liquide à 80 cm de profondeur sur A3).*

Des prélèvements avec rédaction de fiches signalétiques, dont un exemple est présenté en Annexe 5, ont été réalisés en juin 1998 sur la plupart des fosses. Sont décrits :

- ✓ la nature de l'échantillon (eau, sol, gaz) ;
- ✓ le mode de prélèvement (manuel, pelle mécanique, tarière etc...)
- ✓ la désignation de l'échantillon (numéro, profondeur, photos, commentaires) ;
- ✓ un croquis avec coupe géologique ;
- ✓ etc... .

Sur chaque profil, un ou plusieurs échantillons de sol d'environ 500 g ont été prélevés en fonction de l'hétérogénéité des niveaux et des indices de pollution relevés (couleur, odeur, etc...). Au total, 39 fosses ont été réalisées, 37 ont été échantillonnées représentant un total de 68 échantillons. Certaines fosses apparemment saines n'ont pas été échantillonnées. On constate de visu de nombreuses traces de goudron, voire du goudron pur liquide, lors de l'excavation (Photo 4) et en surface (Photo 3).

Un récapitulatif de l'échantillonnage avec les degrés de pollution estimés (indices organoleptiques) est présenté en Annexe 7. Une première estimation quantitative de la pollution a été conduite d'après les observations organoleptiques faites lors de l'excavation des fosses. Dans le tableau de l'Annexe 7, la colonne "degrés de pollution" donne une classification des échantillons en 3 groupes en fonction de leur degré de pollution apparente en goudrons : les moins pollués "+", les pollués "++" et les fortement pollués "+++".

II.4.2. Méthodes analytiques

Le conditionnement des échantillons s'est fait dans des bocaux en verre de type "conserves". Une feuille d'aluminium a été placée entre le caoutchouc et le verre. Les échantillons ont ensuite été transférés en chambre froide (+4°C) à leur arrivée au laboratoire.

Les échantillons jugés pollués et très pollués ont constitué l'essentiel des analyses en août 1998 pour la détermination des concentrations en HAP mais quelques échantillons "propres" ont également été analysés à titre de comparaison. En plus des analyses pour la détermination des concentrations en HAP, certains échantillons ont été analysés pour déterminer leur concentration en carbone organique total (COT) et en azote ammoniacal.

Les protocoles opératoires mis en œuvre pour la détermination des concentrations en HAP, COT et azote ammoniacal dans les sols sont présentés en Annexe 6. Seul le principe opératoire global est présenté ici :

- ✓ **analyse des HAP** : séchage du sol à l'air, broyage, extraction par ASE (Accelarated Solvant Extraction) au dichlorométhane + acétone, échange de solvant (acétonitrile) puis analyse par HPLC-UV (High Pressure Liquid Chromatography UV) des 16 HAP de la liste de l'US-EPA;
- ✓ **analyse du COT** : séchage du sol à l'étuve, broyage, oxydation thermique du carbone présent dans l'échantillon et détection par absorption infrarouge ;
- ✓ **analyse de l'azote ammoniacal** (analyses réalisées à l'Institut Pasteur de Lille) : entraînement à l'eau puis analyse colorimétrique.

II.4.3. Résultats des analyses (août 1998)

II.4.3.1. Les HAP

Le tableau de l'Annexe 8 présente les résultats bruts des analyses HAP réalisées en août 1998 sur les échantillons de sol prélevés en juin1998. Toutes les concentrations sont exprimées en mg/kg de sol sec.

La Figure 16 est une représentation de la répartition spatiale des concentrations en HAP dans les fosses d'échantillonnage, à l'emplacement même de l'ancienne cokerie, qui ne tient pas compte de la profondeur à laquelle l'échantillon a été prélevé (entre 0 et 5 m). Dans le cas de plusieurs échantillons par fosse, seule la concentration la plus forte a été représentée. Les zones fortement polluées sont encerclées.

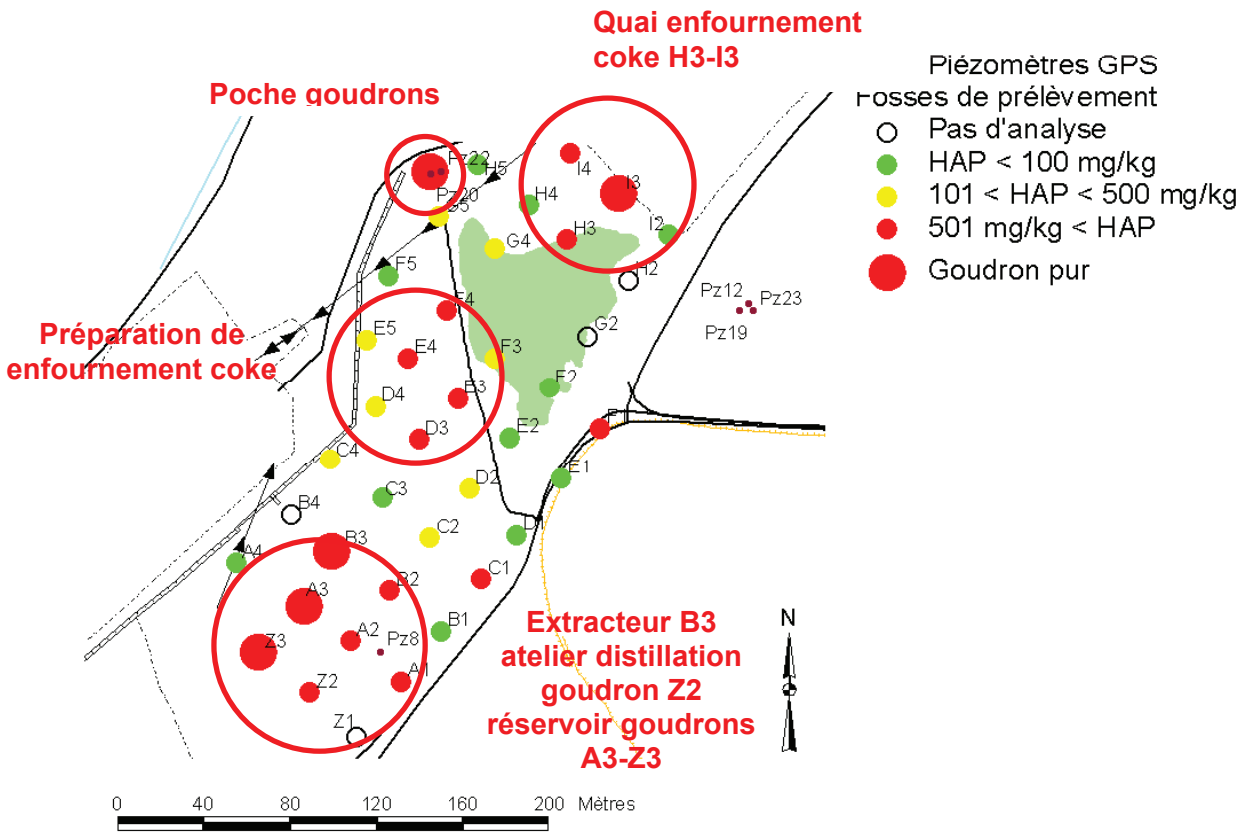


Figure 16 : *Répartition spatiale des teneurs en 16 HAP dans le sol de l'ancienne cokerie toutes profondeurs confondues (analyses d'août 1998 des échantillons prélevés en juin 1998)*

On remarque tout d'abord une forte concentration en HAP sur les lignes Z, A, et B.

Des poches de goudron pur liquide ont été mises à jour en Z3, A3 (Photo 4), B3, I3 et lors de la foration du Pz22 (proche de G5). Elles sont représentées sur la Figure 16 avec des symboles plus gros. Un échantillon de goudron, prélevé en A3, a été analysé afin d'établir la composition du goudron originel. Globalement, toute la zone est polluée, seuls 12 échantillons de sol sur 37 (A4, B1, C3, D1, E1, E2, F2, F5, G5, H4, H5 et I2) uniformément répartis sur la zone d'échantillonnage présentent moins de 100 mg d'HAP par kg de sol (somme des 16 HAP de l'US-EPA).

A titre indicatif, on peut se référer à la norme hollandaise (Tableau 7) qui fixe une concentration limite pour la somme de 10 HAP (naphtalène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, indéno(1,2,3-cd) pyrène) dans les sols à 40 mg/kg au-delà de laquelle un traitement est nécessaire. Une concentration limite existe également pour le benzo(a)pyrène et est fixée à 1 mg/kg. Seulement 7 échantillons satisfont cette norme (A4, B1, C3, E1, F2, H4 et H5).

Tableau 7 : *Valeurs de références et normes concernant certains produits organiques dans l'environnement)*

Composé	Eaux distribuées : valeurs limites (norme française) [µg/L]	Eaux distribuées : valeurs limites (norme européenne) [µg/L]	Eaux distribuées : valeurs limites (OMS) [µg/L]	Valeurs de références hollandaises pour l'intervention dans les sols [mg/kg]
Substances indésirables				
Hydrocarbures		10		40
Phénol		0,5 (totaux)		40
Substances toxiques				
HAP totaux :	0,1 (total des 5)[a]	0,2 (total des 6)[b]		40 (somme des 10)[c]
Benzo (a) pyrène	0,01	0,1	0,7	1
Benzène	1	1	10	130
Toluène	non concerné	non concerné	700	50
Ethylbenzène	non concerné	non concerné	300	25
Xylènes	non concernés	non concernés	500	
Pesticides et produits apparentés total		0,5		4 (pour Aldrine + Dieldrine + Endrine)
par substance sauf		0,1		
Aldrine		0,03		
Dieldrine		0,03		
Hexachlorobenzène		0,01		30 (chlorobenzènes totaux)
PCB				1 (somme des 7)[d]

a) Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(g,h,i)pérylène, Indeno(1,2,3-cd)pyrène
b) Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Benzo(g,h,i)pérylène, Indeno(1,2,3-cd)pyrène
c) Naphtalène, Anthracène, Phénanthrène, Fluoranthène, Benzo(a)anthracène, Chrysène, Benzo(a)pyrène, Benzo(g,h,i)pérylène, Benzo(k)fluoranthène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène
d) PCB congénères

Sources :
[STRUILLOU, 1996]
France : décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles.
UE : directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (CE, 1998).
OMS : directive de qualité pour l'eau de boisson, 1996.

D'après le rapport *CNRSSP/98/20 [DERVIN, 1998]* le bruit de fond géochimique régional pour la somme des 16 HAP est de 1 mg/kg. Cependant dans les échantillons contenant du charbon, la concentration de la somme des 16 HAP est supérieure du fait de la présence naturelle de HAP dans le matériau. Il est donc difficile d'utiliser ce bruit de fond dans le cas du site étudié car la couche superficielle du sol est constituée de fines charbonneuses. Ceci explique pourquoi des échantillons propres avec quelques passées charbonneuses sont caractérisés par des concentrations relativement fortes en HAP (> 500 mg/kg de sol sec).

Il apparaît une zone importante de pollution centrée sur A2. Il s'agit, d'après le plan d'usine de 1912, des extracteurs (B3 et [b] sur la Figure 15), de l'atelier de distillation de goudron (Z2 et [c] sur la Figure 15) et des réservoirs à goudron (A3, Z3 et [b] sur la Figure 15). Situées en limite de l'échantillonnage, les limites sud-ouest, sud et sud-est de cette zone sont inconnues. Une extension de l'échantillonnage vers le sud-ouest serait judicieuse mais n'a pas été possible à cause de la présence d'une conduite d'eau enterrée dont le cheminement n'est pas connu avec précision.

La deuxième zone relevée lors de l'échantillonnage (centrée sur E4, Figure 15 et Figure 16) est également marquée par de fortes concentrations en HAP. Elle correspond à des espaces de circulation pour la préparation et l'enfournement du coke. L'échantillonnage du point G3, normalement au centre d'un bosquet a été impossible faute d'accès (Figure 16), il aurait été intéressant d'y effectuer un prélèvement à la tarière.

La troisième zone de pollution en H3-I3 correspond aux quais d'enfournement du coke qui se prolongent encore 60 m à l'intérieur de l'emprise industrielle voisine où aucune investigation n'est possible en raison de l'activité en cours (Figure 13).

Enfin une zone très limitée, à l'emplacement des piézomètres Pz20/22 présente du goudron liquide, probablement une fosse enterrée non vidangée avant remblaiement.

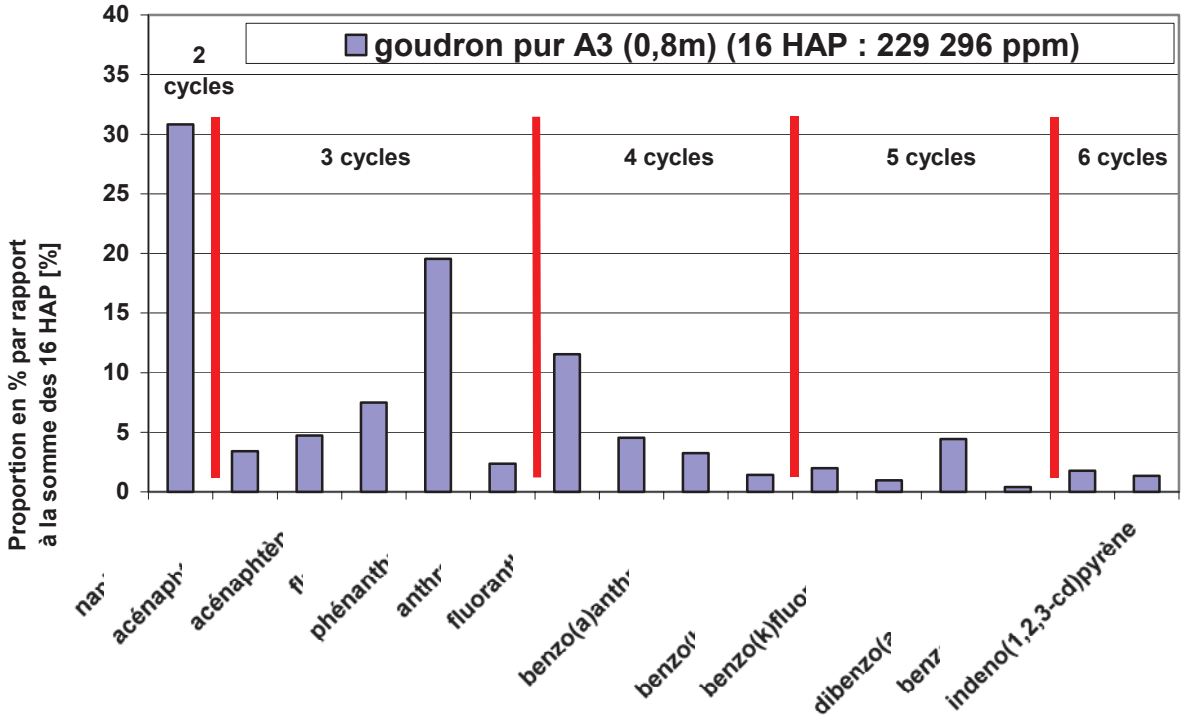


Figure 17 : *Spectre de répartition (en % massique) des 16 HAP de l'EPA du goudron pur (fosse A3)*

Grâce à l'analyse de l'échantillon A3 qui est un goudron pur, nous avons pu caractériser le spectre des 16 HAP de l'US-EPA (Figure 9) d'une des sources de pollution (Figure 17). Le naphtalène prédomine (31%), suivi du phénanthrène (19,5%) et du fluoranthène (11,6%). Cette répartition est classique pour un goudron issu de la pyrolyse du charbon *[BARBE, 1997].*

II.4.3.2. Le carbone organique

Le taux de carbone organique (COT) a été analysé sur certains échantillons non pollués, afin de connaître ce paramètre qui joue un rôle dans la mobilité des HAP par adsorption (la constante d'adsorption des HAP étant fortement liée au COT des sols *[KARICKHOFF et al., 1979*].

Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : *Concentrations en carbone organique dans les sols (% massique par rapport au sol sec)*

N°	Fosse	Prof. (m)	Description	Carbone Inorganique % sol sec	Carbone Organique % sol sec
1	A1	0-2	remblai noir schisteux	0,07	9,0
19	E2	1-2,6	limon argileux beige-roux à passées schisto-charbonneuses	0,7	4,2
32	H4	2-4,5	limon argileux brun à gris verdâtre	0,3	0,9
33	H5	1-2,5	limon argileux roux avec quelques passées	0,01	2,2
34	H5	2,5-5	limon argileux gris-verdâtre	2,3	0,7
39	G5	1-1,6	sables ocres	0,01	0,1
43	A4	0-1,8	remblai schistes sableux fins	0,01	28,9
61	F4	1,5	argilo-limoneux gris-vert : en biais	0,1	1,8
64	F5	1,2-1,9	niveau argilo-limoneux à silex	0,01	0,4

Les concentrations en carbone organique sont très faibles dans les niveaux non pollués, elles vont de 0,1 à 1,8 %. Dans les niveaux présentant des passées charbonneuses cette valeur est plus forte, car on analyse également le carbone du charbon. En ce qui concerne le carbone inorganique les valeurs sont faibles et inférieures à 1 %, sauf pour les limons argileux qui contiennent environ 2 % de carbone inorganique.

II.4.3.3. L'azote ammoniacal

Le tableau de l'Annexe 9 présente les concentrations brutes en azote ammoniacal. Les concentrations en NH_4^+ sont exprimées en mgNH_4^+/kg de sol brut non séché.

Seuls quatre échantillons (I4, H3, D3 et F4) présentent des concentrations supérieures à 100 mg NH_4^+/kg sol brut. Ces points ne correspondent pas à de fortes concentrations en HAP. Les points présentant les plus fortes concentrations sont H3 et I4 avec respectivement 650 et 310 mg NH_4^+/kg. Ces deux points sont situés sur la zone correspondant aux quais d'enfournement du coke. Les deux autres points, D3 et F4, avec des concentrations de 230 et 120 mgNH_4^+/kg correspondent à la zone de préparation et d'enfournement du coke. Les fortes valeurs sont systématiquement mesurées sur des échantillons prélevés à une profondeur supérieure à 1,5 m. Ceci peut s'expliquer par la relativement forte solubilité (S = 1 180 g/l environ) de l'azote ammoniacal qui serait donc lessivé en surface par les précipitations.

II.5. Caractérisation de l'extension de la pollution dans la nappe superficielle (pollution diffuse)

En juin 1998, le réseau de piézomètres préexistants a été complété afin de mieux couvrir la zone d'étude. En complément du réseau de 1994, 10 piézomètres additionnels ont été installés en nappe superficielle (Pz14, Pz18/Pz21, Pz20/22, Pz19/23, Pz15, Pz17 et Pz16), d'une profondeur maximale de 10 m.

Photo 5 : *Foration et installation de piézomètres*

La technique de foration utilisée est l'Odex (Photo 5) décrite en Annexe 11.

L'implantation des piézomètres, représentée sur la Figure 18 (et de façon schématique en Annexe 4), a été définie selon plusieurs critères :

- aligner les piézomètres dans le sens des écoulements supposés, d'après nos connaissances sur le fonctionnement hydrologique du site, de façon à disposer d'analyses amont et aval de la zone de pollution historique ;
- encadrer la zone de l'ancienne cokerie (cadre noir) de piézomètres ;
- constituer 3 couples de piézomètres pour les essais d'eau dans l'aquifère (Pz20/22, Pz19/23, Pz18/21). Ainsi les Pz22, Pz23 et Pz21 constituent des piézomètres d'observation (mesures de rabattement) pour les pompages d'essais effectués respectivement dans les Pz20, Pz19 et Pz18 ;

Le Pz22 n'a pu être équipé en raison de la trop grande concentration de goudrons (goudron pur!).

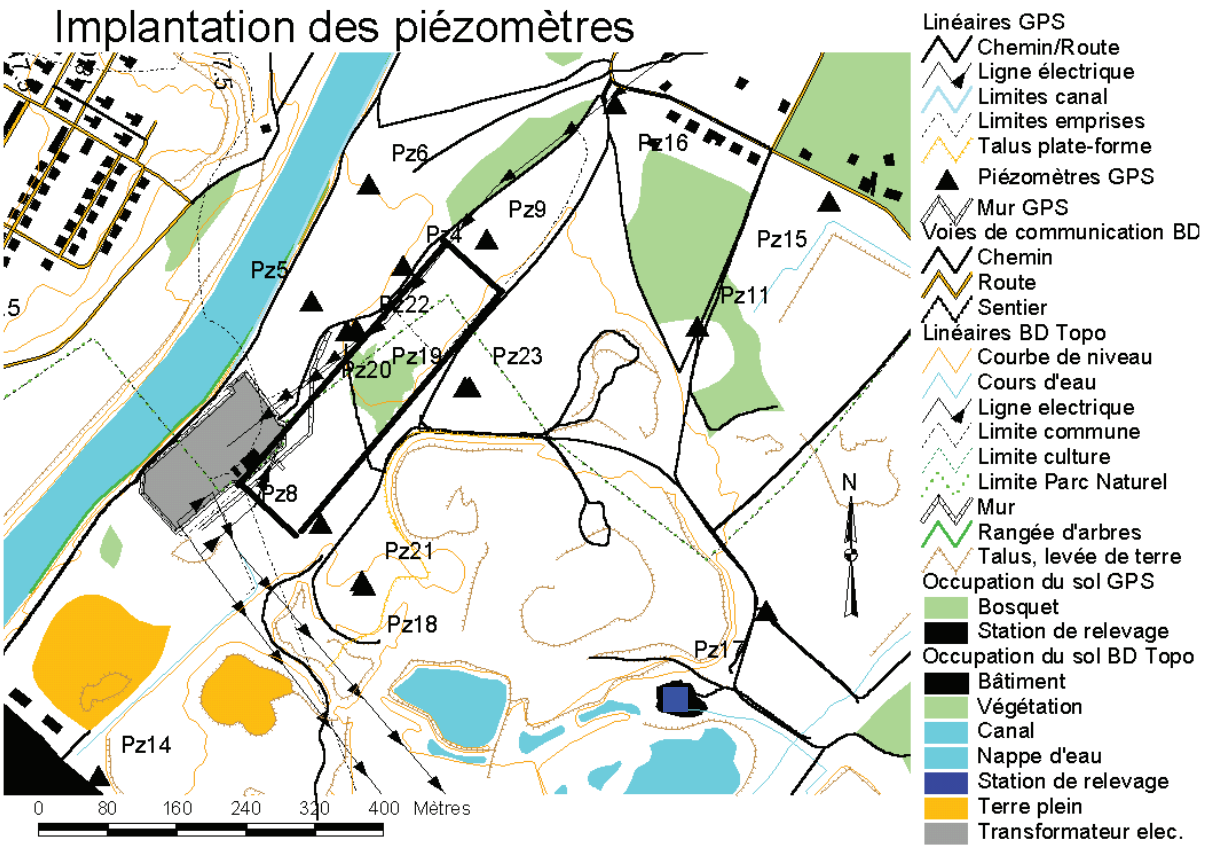


Figure 18 : *Implantation des piézomètres de la nappe superficielle, visualisation sous ArcView ©*

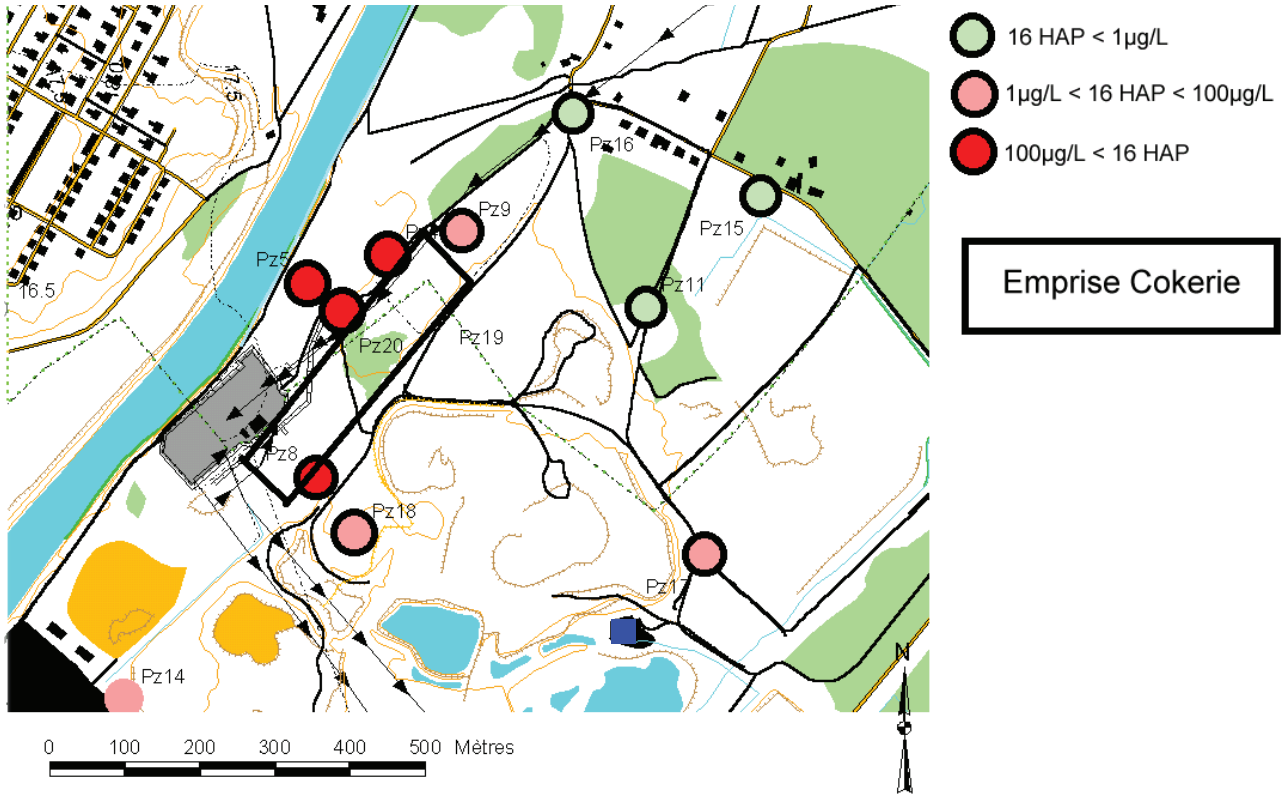


Figure 19 : *Cartographie de la pollution pour les 16 HAP dans la nappe superficielle*

II.5.1. Méthodes d'échantillonnage des eaux (octobre 1998)

L'échantillonnage de tous les piézomètres a été réalisé en octobre 1998 après une purge de l'ouvrage correspondant à cinq fois son volume afin de prélever une eau représentative de la nappe *[LECOMTE, 1995].* La durée et le débit de purge ont été choisis afin d'obtenir la purge des 5 volumes du piézomètre en un minimum de temps mais sans vider le piézomètre. Le niveau a ainsi été contrôlé avant et après purge. La motopompe a été préférentiellement utilisée dans les piézomètres peu pollués. Dans le cas où la pompe immergée était utilisée, le tuyau véhiculant le liquide était changé à chaque piézomètre.

A chaque fois, il a été prélevé 2 échantillons d'un litre destinés aux analyses des HAP en solution. Ces échantillons ont été conservés dans des bouteilles en verre borosilicaté brun munies de bouchons avec capsule en Téflon et empoisonnés à l'azoture de sodium (2-3 gouttes d'une solution molaire de NaN_3) afin d'éviter la dégradation bactérienne éventuelle de l'échantillon.

Trois ouvrages ont posé problème lors de la phase d'échantillonnage à cause des rabattements trop importants observés pendant la purge, ce sont les piézomètres 4 et 5 et 18. Les Pz4 et Pz5 sont anciens et leurs états de fonctionnement ne sont pas garantis ; le fait qu'ils se soient vidés est peut-être dû à un colmatage partiel de la crépine. Dans le cas du Pz18 la vidange du piézomètre (réalimentation naturelle du piézomètre inférieure au débit de pompage de 3 à 6 m^3/h) est liée à la faible épaisseur de la nappe à cet endroit du site. Dans ces trois cas, le prélèvement s'est fait après la remontée de la nappe.

Tous ces échantillons ont été stockés au frais et à l'abri de la lumière dans une glacière jusqu'au retour au laboratoire où ils ont été transférés en chambre froide à 4°C.

II.5.2. Méthodes d'analyses

L'analyse des HAP en solution par Chromatographie Liquide Haute Pression (HPLC-UV) couplé à un détecteur à barrette de diode (même principe que pour les analyses de sols) a été précédée d'une phase d'extraction liquide/liquide avec du dichlorométhane, d'une concentration de l'extrait et d'un échange de solvant (méthodologie détaillée en Annexe 6).

Les analyses BTEX ont été sous-traitées à un laboratoire extérieur et réalisées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectrométre de masse (méthodologie détaillée en Annexe 6).

II.5.3. Teneur en HAP dans la nappe superficielle

Les concentrations en HAP et la répartition spatiale :

Les résultats des analyses réalisées sur l'eau des piézomètres en octobre 1998 sont présentés, composé par composé, dans le tableau de l'Annexe 12 pour la somme des 6 HAP (norme européenne : Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Benzo(ghi)pérylène, Indéno(cd)pyrène) et pour les 16 HAP de l'US-EPA. Le graphique de la Figure 20 reprend ces résultats pour les piézomètres les plus pollués, à l'exception du Pz20 pour des raisons de lisibilité.

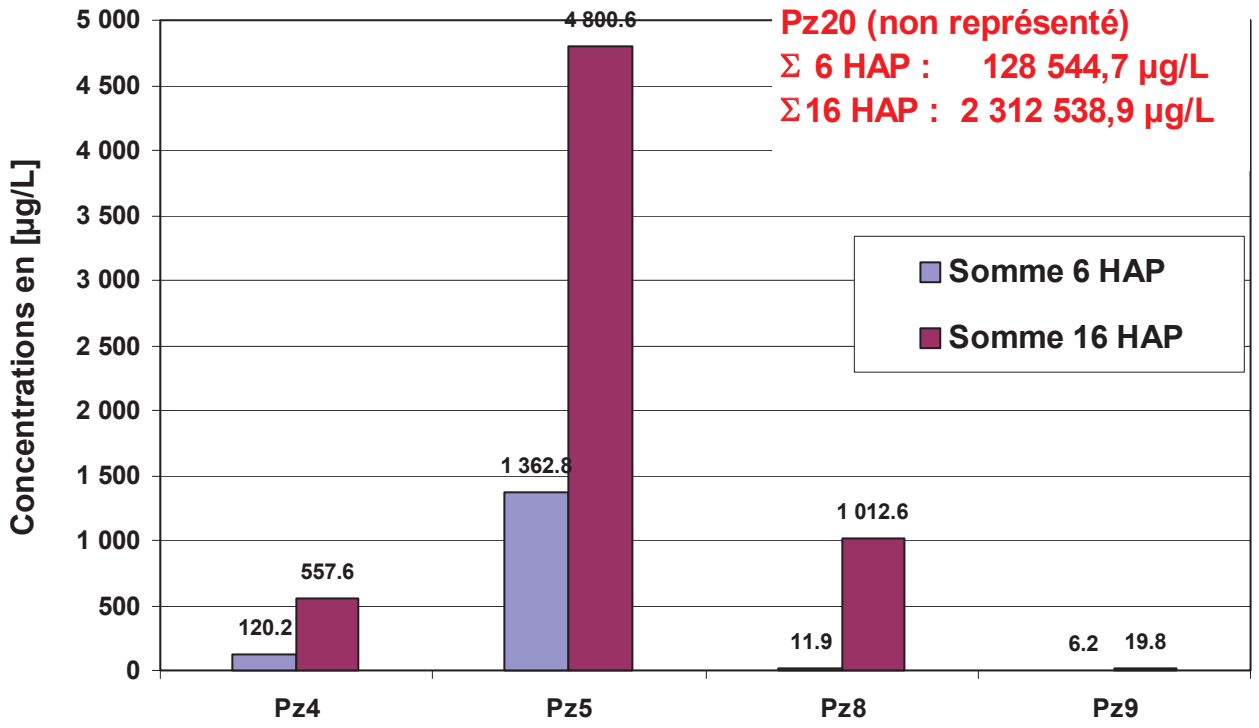


Figure 20 : *Sommes des 6 HAP (UE) et 16 HAP (US-EPA) pour les piézomètres les plus pollués de la nappe superficielle*

Le piézomètre le plus pollué est le Pz20 qui présente des concentrations très supérieures aux autres points de mesure (2,3 g/L). Il s'agit d'une source de pollution active (poche de goudron) mise en évidence lors de la foration de l'ouvrage. Dans un registre moindre et avec des concentrations comprises entre 500 et 4 800 µg/L, on recense les piézomètres Pz5, Pz8 et Pz4 qui caractérisent des points forts de pollution pour les eaux superficielles. Ensuite, avec des concentrations comprises entre 1 et 100 µg/L, suivent les Pz9, Pz14, Pz18, Pz19 et Pz17. Ces points sont touchés par la pollution mais pas sous l'influence directe d'une source de pollution. Enfin, tous les autres piézomètres présentent des concentrations inférieures à 1 µg/L avec de nombreux composés non recensés car de concentration inférieure à la limite de détection de l'HPLC-UV comprise 0,004 et 0,04 µg/L suivant le composé HAP (Annexe 12). En novembre 1999 et mars 2000 de nouvelles analyses ont été réalisées dans les Pz9, Pz18 et Pz19 avec cette fois-ci 3 échantillons par piézomètres (Annexe 13 et Annexe 14). Les résultats sont similaires aux valeurs d'octobre 1998.

A titre indicatif, on peut comparer, pour les 6 HAP, la valeur mesurée à la limite de la norme européenne concernant la distribution des eaux de consommation qui est de **0,2 µg/L**. Cette comparaison permet de classer ces eaux comme polluées ou non polluées par rapport à leur potabilité. Sept piézomètres échantillonnés dépassaient ce seuil, il s'agit des Pz4, Pz5, Pz8, Pz9, Pz17, Pz18 et Pz20

Parmi les piézomètres les plus pollués, les Pz20, Pz4 et Pz8 sont logiquement situés à proximité immédiate de l'emprise de l'ancienne cokerie (cadre noir sur la Figure 19) : les échantillonnages de sols les plus polluées (A3, Z2) se trouvent à 45 m du Pz8. Le Pz5, le dernier du groupe de piézomètres les plus pollués, est lui situé légèrement plus au nord entre l'emprise de la cokerie et le canal. Il indique manifestement qu'il s'agit d'une zone fortement polluée.

La représentation spatiale se trouve sur la Figure 19 pour la somme des 16 HAP de la liste de l'US-EPA. Cette cartographie confirme l'extension de la pollution en HAP au nord entre l'emprise de la cokerie et le canal. Toutefois, des traces d'HAP apparaissent également au sud de l'emprise de la cokerie à plusieurs centaines de mètres de distance. Il s'agit probablement de l'influence d'autres sources de pollution non identifiées. L'étude hydrodispersive confirmera ultérieurement cette hypothèse.

Le spectre des HAP :

Pour l'étude des spectres de distribution des HAP, il n'a été retenu que les piézomètres ayant des concentrations significatives, soit les Pz4, Pz5, Pz8, Pz9 et Pz20 qui ne présentent aucun composé de concentration inférieure à la limite de détection de l'HPLC-UV (Annexe 12).

Les spectres des 5 piézomètres ainsi suivis sont représentés sur la Figure 21. Pour les Pz8 et Pz20 le naphtalène est largement majoritaire. Pour les Pz4, Pz5 et Pz9, on observe un décalage vers les produits plus lourds par rapport au spectre du goudron pur (Figure 17) avec des concentrations en naphtalène qui ne dépassent pas 20% de la somme des 16 HAP de l'US-EPA. Les composés à 2 et 3 cycles, le naphtalène et surtout l'acénaphtène, restent toutefois les plus présents mais les composés plus lourds (4, 5 et 6 cycles) sont encore bien représentés avec plus de 2 à 3%.

On distingue 3 types de spectres distincts :

1. **spectre "1"** : le naphtalène (2 cycles) est largement majoritaire : Pz8 et Pz20 ;
2. **spectre "2"** : l'acénaphtène (3 cycles) est largement majoritaire : Pz9
3. **spectre "3"** : le phénanthrène domine mais avec une bonne représentation de l'acénaphtène, du fluorène (3 cycles) et du fluoranthène (4 cycles) : Pz4 et Pz5

Pour le **spectre "1",** les Pz8 et Pz20 sont situés à proximité immédiate de l'emprise de la cokerie et des zones de goudrons purs identifiées dans l'étude des sols. Logiquement, ce 1er spectre devrait donc se rapprocher de celui du goudron originel où le naphtalène prédominait (Figure 17). Effectivement, avec environ 70 % de naphtalène, 11 % d'acénaphtène et 6% de fluoranthène (Figure 21), la distribution est proche de celle de l'échantillon de goudron retrouvé dans le sol à l'emplacement de l'atelier goudron de l'ancienne cokerie. Les Pz8 et Pz20 sont donc directement influencés par des "sources de pollution" actives de l'emprise de la cokerie notamment pour le Pz20 qui affiche des concentrations très importantes (2,3 mg/L) : probablement un suintement important de fosses ou cuves à goudron de l'ancienne cokerie qui ont été remblayées sans être vidangées.

Le naphtalène est, dans le groupe des HAP, le composé le plus soluble, le plus volatil et celui qui se dégrade le plus rapidement. Par comparaison, l'acénaphtène est 10 fois moins soluble et 2 fois moins biodégradable *[BARBE, 1997]*. Ensuite avec les HAP à 3 cycles et plus, ces propriétés s'affaiblissent très sensiblement. Une atténuation des teneurs en naphtalène et le décalage vers les composés plus lourds pourrait traduire un certain éloignement de la source de pollution ou des déversements ponctuels.

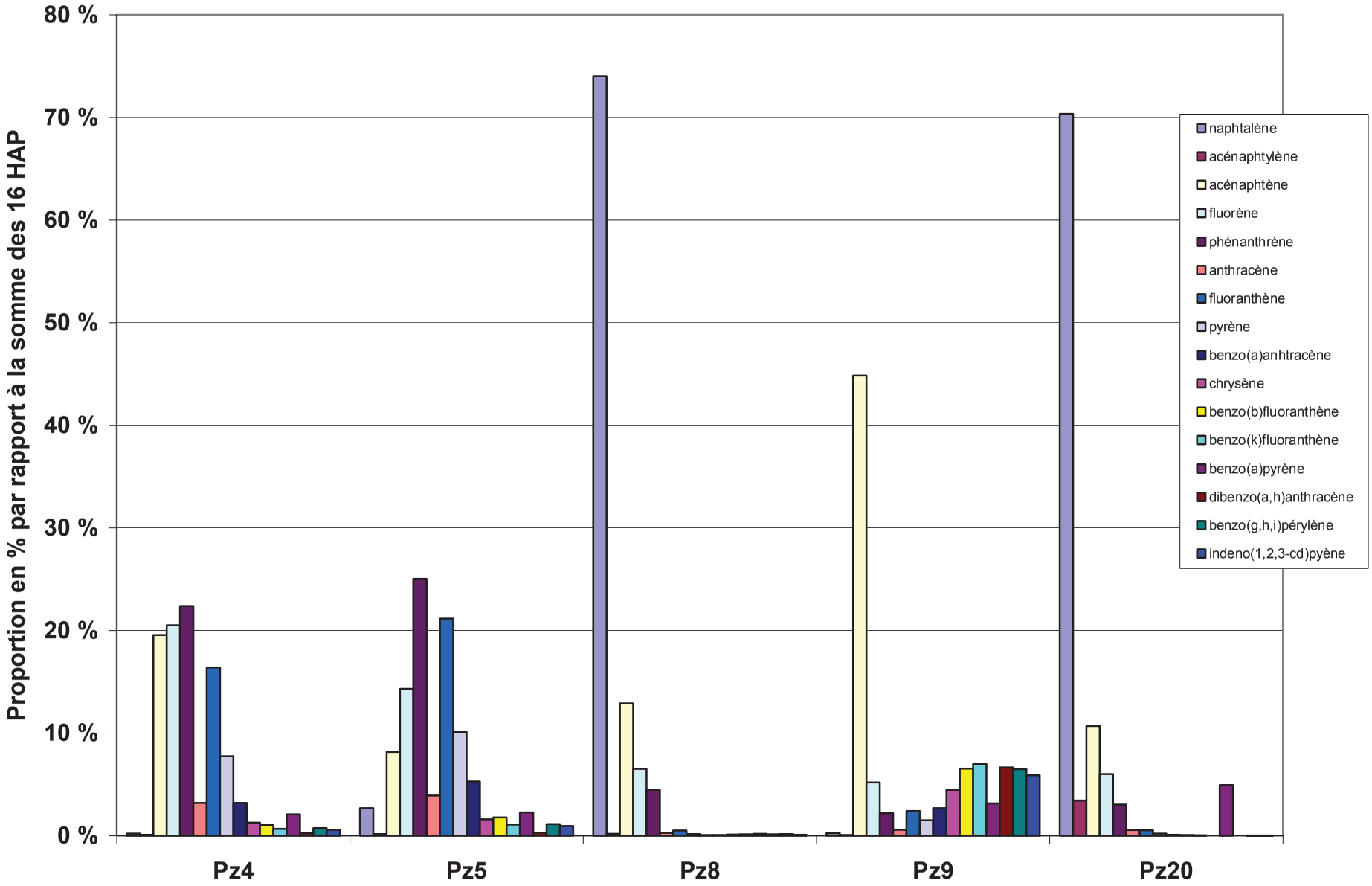


Figure 21 : *Distribution (%)des HAP de la liste de l'US-EPA (Figure 9) pour les piézomètres les plus pollués*

La Figure 22 montre l'évolution de la distribution du spectre des 16 HAP sur un transect issu de la zone "source de pollution", soit le **spectre "1"** (Pz8 et Pz20), vers la zone située entre le canal et la cokerie, soit le **spectre "3"** (Pz4 et Pz5). Le naphtalène est bien l'espèce dominante dans les eaux les plus polluées, c'est à dire dans la zone "source de pollution" (74 et 70% respectivement pour Pz20 et Pz8). Par contre, il est quasi absent dans les eaux situées de la zone entre le canal et la cokerie, à une centaine de mètres de la source en direction du canal (2,7 et 0% respectivement pour Pz5 et Pz4). De même, le graphique montre que pour des HAP à 3 cycles (acénaphtylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène) et à 4 cycles (fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène), la distribution s'inverse par rapport au naphtalène (Figure 22) : ces composés sont peu ou pas présents dans la zone "source de pollution" (**spectre "1"**) alors qu'ils représentent une part importante du spectre dans la zone éloignée d'une centaine de mètres de la cokerie vers le canal (**spectre "3"**).

La Figure 23 montre l'évolution de la distribution du spectre des 16 HAP sur un transect issu de la zone "sources de pollution", soit le **spectre "1"** (Pz8 et Pz20), vers l'est de l'emprise de la cokerie, soit le **spectre "2"** (Pz9). Comme précédemment, le naphtalène espèce dominante de la zone "source de pollution", n'apparaît plus à une centaine de mètres à l'est de l'emprise de la cokerie. Par contre, la Figure 23 montre que sur le spectre "2" l'acénaphtène devient nettement majoritaire et qu'il y a une forte présence des HAP à 5 et 6 cycles alors que ces derniers sont peu ou pas présent sur le **spectre "1".**

L'étude des concentrations pour la somme des 6 ou des 16 HAP et de leur spectre tend donc à montrer que la pollution au goudron subsiste encore sur le site de l'ancienne cokerie en raison de la présence de sources de pollutions (cuves à goudrons non vidangées). La zone entre l'emprise de la cokerie et le canal est fortement touchée par la pollution. Toutefois la présence de HAP à 3-4 cycles (**spectre "3"** Figure 22) pourrait indiquer que cette zone a été intensément alimentée par un flux polluant provenant de l'emprise de la cokerie. Par contre, l'absence de naphtalène (soluble et biodégradable) indique qu'à la date des prélèvements (octobre 1998) la zone était sous l'influence d'un lessivage par un flux hydraulique souterrain non chargé qui aurait dilué le naphtalène sans toutefois remobiliser les 3-4 cycles : alimentation de la nappe superficielle par les eaux du canal?

A l'est de l'emprise de la cokerie, la pollution est également présente. Toutefois, on note une prédominance des composés à 4-5 et 6 cycles et de l'acénaphtène (**spectre "2"** Figure 23). Ceci pourrait indiquer la présence d'une pollution historique non alimentée par des "sources de pollution" et qui se biodégrade dans le temps. La présence d'acénaphtène (10 fois moins soluble et 2 fois moins biodégradable que le naphtalène) indiquerait que la zone est alimentée par un flux hydraulique modéré sain capable de dilué le naphtalène sans mobiliser l'acénaphtène. Autre hypothèse possible et complémentaire, les traces de pollution en Pz9 ne proviendraient pas des sources identifiées sur l'emprise de la cokerie. Toutefois, avec qu'un seul représentant (le Pz9), le **spectre "2"** ne permet pas d'établir de bilan fiable.

En première conclusion, il apparaît qu'un transport de polluants se fait depuis l'emprise de la de la cokerie vers le canal au nord-est. Toutefois, les écoulements des eaux souterraines semblent assez complexes car si effectivement ils sont à l'origine de la diffusion de la pollution, ils génèrent également des flux sains qui lessivent les HAP les plus solubles. La modélisation d'un fonctionnement hydrodispersif du site confirmera ultérieurement ces premières hypothèses.

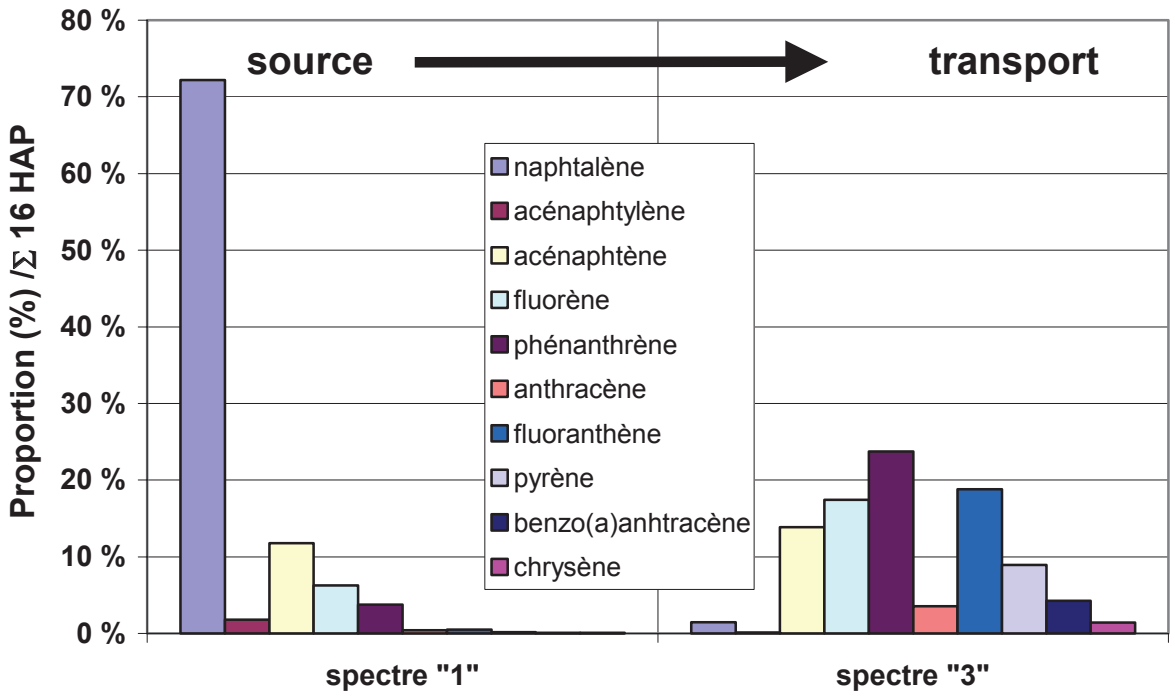


Figure 22 : *Distribution (% / Σ16 HAP) du naphtalène (2 cycles), acénaphtylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène (3 cycles), fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène et chrysène (4 cycles) dans les piézomètres depuis une zone source (spectre "1") vers le canal (spectre "3")*

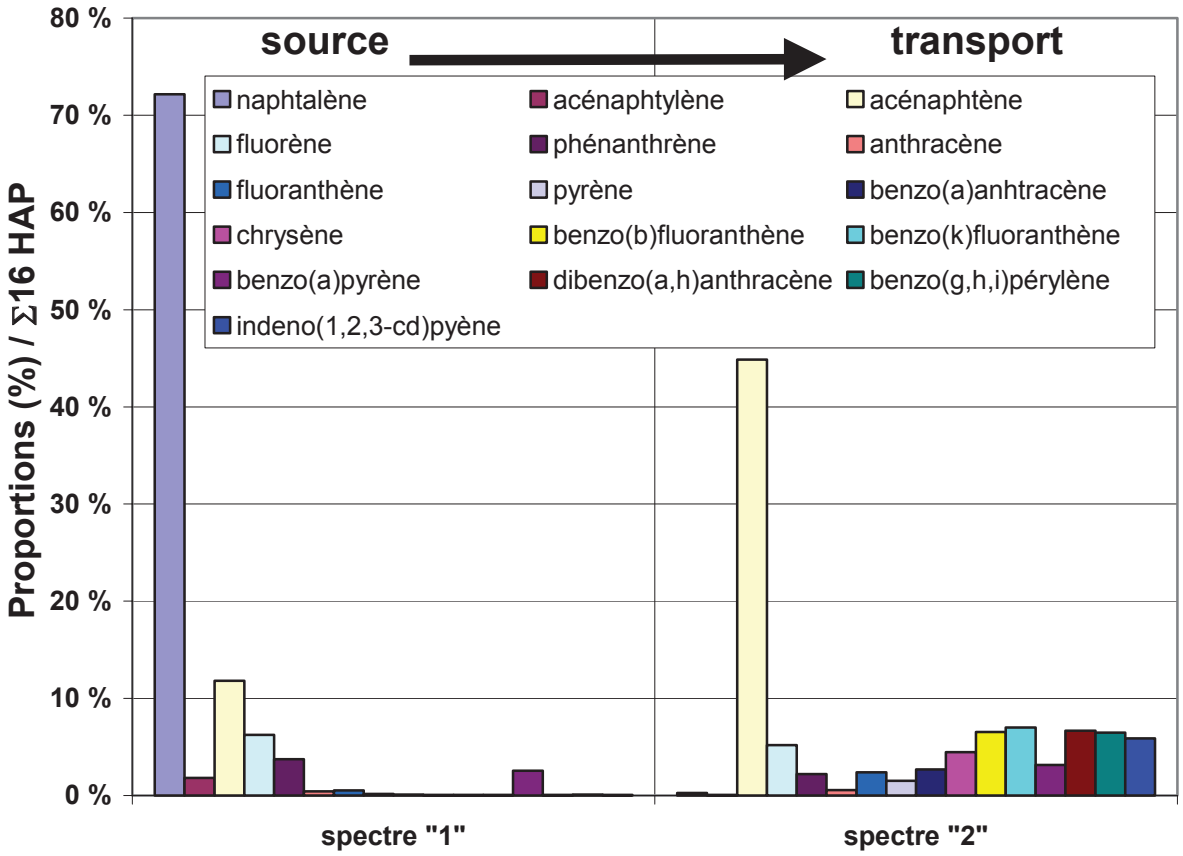


Figure 23 :*Distribution (% / Σ16 HAP) des 16 HAP de l'US-EPA dans les piézomètres depuis une zone source (spectre "1") vers l'est (spectre "2")*

II.5.4. Teneurs en BTEX dans la nappe

La répartition spatiale

Les concentrations en BTEX dissous des eaux prélevées dans les piézomètres en octobre 1998 sont présentées dans le Tableau 9 et la Figure 24. L'OMS dans sa directive de qualité pour l'eau de boisson de 1996 préconnise des concentrations seuils en BTEX (Tableau 7), à savoir 10, 700, 300 et 500 µg/L respectivement pour le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes. Ces valeurs sont utilisées en l'absence de valeurs limites pour imposer un traitement dans les normes française (décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001) et européenne (directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998).

Tableau 9 : *Résultats des analyses en BTEX d'octobre 1998 dans les eaux de la nappe superficielle*

Lieu de prélèvement.	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	Xylènes	Somme
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
seuil OMS	**10**	**700**	**300**	**500**	
Pz4	37	<5	10	<10	**47**
Pz5	47	<5	<10	<10	**47**
Pz8	240	65	110	190	**605**
Pz9	<1	<5	<10	<10	
Pz11	<1	<5	<10	<10	
Pz12	<1	<5	<10	<10	
Pz15	<1	<5	<10	<10	
Pz16	<1	<5	<10	<10	
Pz17	<1	<5	<10	<10	
Pz18	<1	<5	<10	<10	
Pz19	<1	<5	<10	<10	
Pz20	460	8 700	25 000	150 000	**184 160**

Seuls 4 piézomètres situés dans la nappe alluvionnaire sont caractérisés par des concentrations en benzène dissous supérieures aux 10 µg/L de la directive de l'OMS. Ce sont les Pz4 (37 µg/L), Pz5 (47 µg/L), Pz8 (240 µg/L) et Pz20 (460 µg/L). Toutes les autres eaux échantillonnées ont des concentrations inférieures à la limite de détection (respectivement 1, 5, 10 et 10 µg/L pour le benzène, toluène, ethylbenzène et les xylènes).

En ce qui concerne le toluène, seul le Pz20 (8 700 µg/L dépasse la valeur limite de l'OMS (700 µg/L). Tous les autres échantillons ont des concentrations inférieures à la limite de détection (5 µg/L) à l'exception du Pz8 (65 µg/L).

L'éthylbenzène est détecté dans les Pz4 (10 µg/L), Pz8 (110 µg/L) et le Pz20 (25 000 µg/L) qui est le seul piézomètre pour lequel la concentration est supérieure à la valeur limite de la directive de l'OMS (300 µg/L).

Les 3 xylènes (ortho, méta et para) ne sont présents en concentration supérieure à la valeur limite de l'OMS (500 µg/L) que dans l'eau du Pz20 (150 000 µg/L). Dans le Pz8, ces espèces sont détectées mais en concentrations moindres : 190 µg/L.

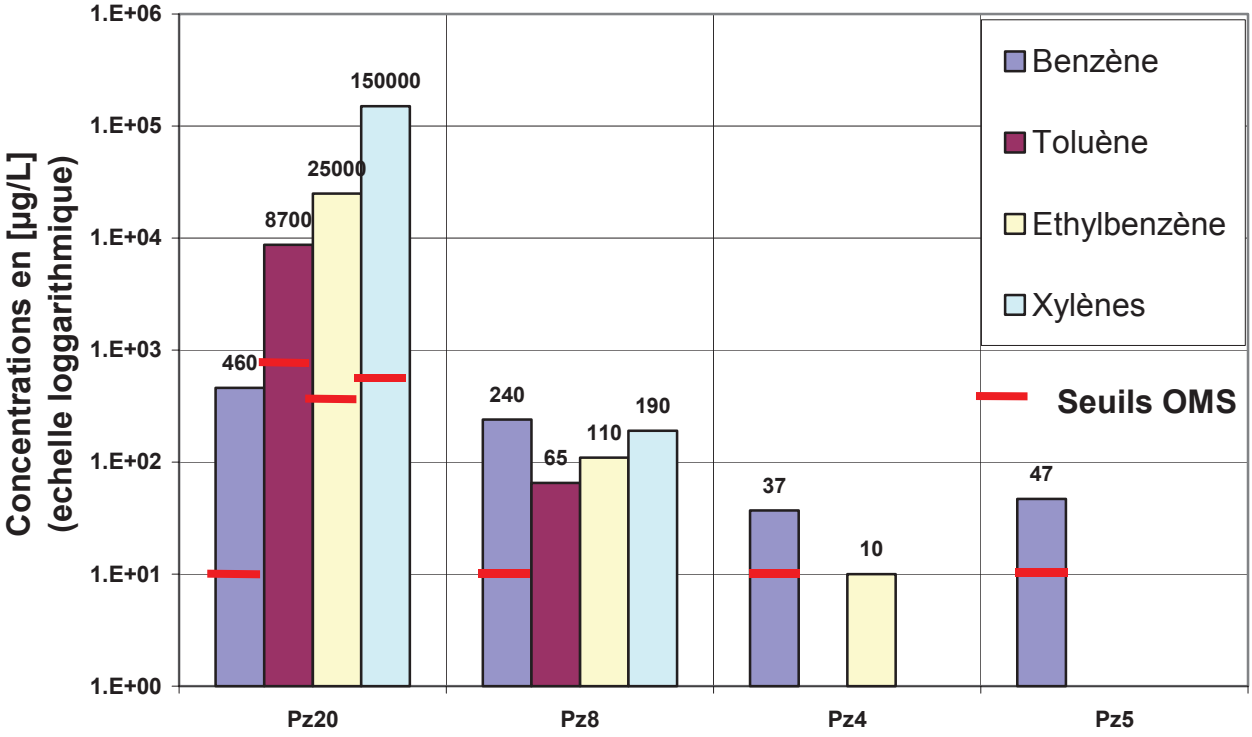


Figure 24 : *Concentrations en BTEX dissous (µg/L, échelle logarithmique) dans l'eau des différents piézomètres et valeurs limites correspondantes pour les eaux de consommation (OMS).*

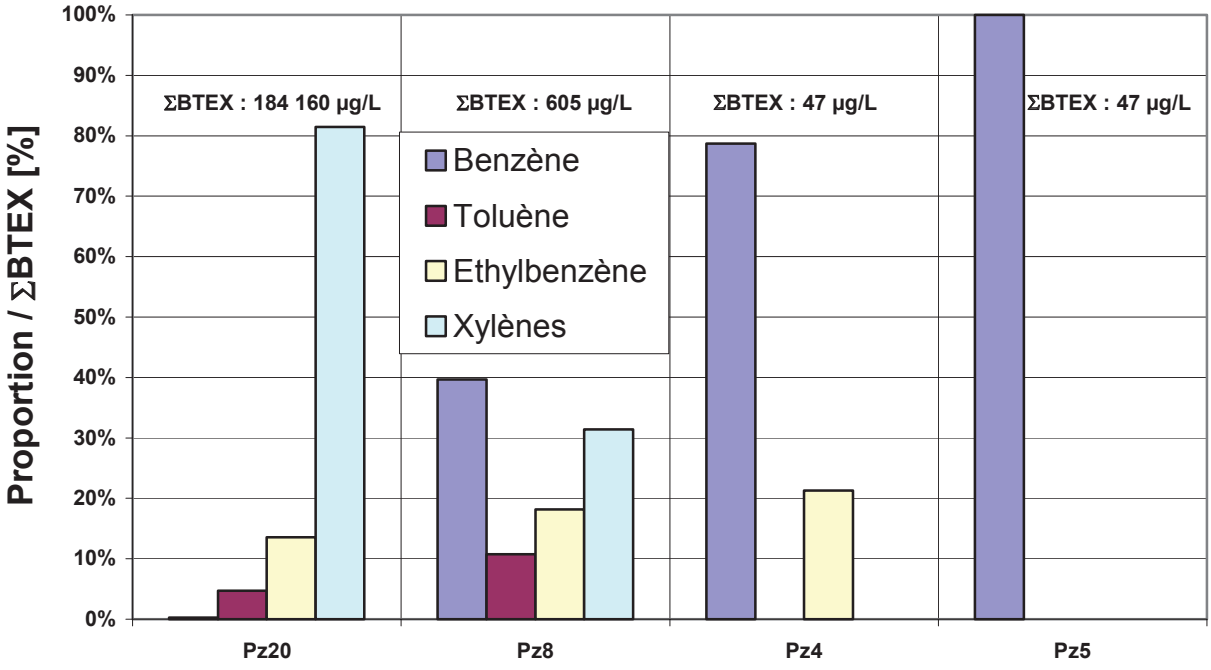


Figure 25 : *Répartition des différents BTEX (%) depuis une zone source (Pz20 et Pz8) vers le canal (Pz4 et Pz5)*

La répartition des concentrations en BTEX dans le réseau piézométrique met en évidence une zone de forte concentration centrée sur la zone "source de pollution" (l'ensemble Pz20 et Pz8) et une diminution des teneurs vers le canal (zone Pz4 et Pz5) direction supposée du transport de la pollution.

Le graphique de la Figure 25 illustre les proportions relatives en BTEX par rapport à la somme des BTEX. Le benzène qui ne représente que 0,25 % de la concentration en BTEX dans le Pz20 atteint 100 % dans le Pz5. Parallèlement, le xylène représente 81,5 % des BTEX dans le Pz20 et est absent de l'échantillon dans le Pz5. Cette répartition peut s'expliquer par le comportement des différents composés, en effet dans le groupe des BTEX, le benzène est la substance la plus soluble et donc celle qui migre le plus dans la nappe. Par contre les autres composés restent localisés autour de la zone source de la pollution.

A partir de ces résultats, on peut proposer une cartographie de l'extension spatiale de la pollution en benzène de la nappe alluvionnaire. La source de pollution serait centrée sur l'emprise de la cokerie. Le Pz20, fortement chargé, confirme les analyses HAP : il s'agit bien d'une source active de pollution. Le spectre de distribution des BTEX dans ce piézomètre est majoritairement composé de xylènes (80 %) avec une très faible proportion de benzène (0,25% pour ce BTEX le plus soluble et fortement volatile). Ce dernier pourrait donc avoir déjà migré, soit par diffusion hydraulique ou/et évaporation en zone non saturée.

Le Pz8 présente un spectre similaire au Pz20 mais avec la présence significative de benzène (40%). Cela indique que ce piézomètre est sous l'influence directe d'une source de pollution proche avec un flux de benzène en cours de diffusion.

Enfin, les Pz4 puis Pz5 voient leurs proportions de benzène s'affirmer par rapport aux autres composés. Cela indique un éloignement par rapport à la source de pollution "l'emprise de la cokerie" puisque seul ce composé peut, grâce à sa forte solubilité, diffuser suffisamment loin. Au Pz5, piézomètre le plus éloigné de l'emprise de la cokerie, le benzène n'est plus que le seul représentant des BTEX.

Les conclusions faites avec les BTEX recoupent en partie celles des HAP : le transport de polluant se ferait en direction du canal (nord-est). Toutefois, le benzène n'indique aucun transport de la pollution en direction du sud ou de l'est.

Ceci laisse donc à penser la direction principale de transport est vers le canal et qu'éventuellement il pourrait en exister d'autre de bien moindre importance. Ces hypothèses devront être confirmées par la modélisation hydrodispersive ultérieure.

II.6. Etude hydrogéologique

II.6.1. Observations

Les relevés périodiques des hauteurs d'eau dans les piézomètres, débutés en juin 1998, se sont poursuivis à raison d'une mesure tous les mois, soit plus de trois années d'observations. Les courbes d'évolution des hauteurs piézométriques de la nappe superficielle (système de nivellement : IGN69) ainsi que du niveau d'eau du canal sont présentées sur la Figure 26.

L'analyse de la Figure 26 met en évidence les comportements similaires des piézomètres (même sens d'évolution) et des variations de niveaux significatives de la surface piézométrique de la nappe superficielle (nappe semi-captive), soit un mètre entre les hautes eaux (hiver) et les basses eaux (été). Les saisons influencent donc directement l'aquifère, ce qui est généralement le cas des nappes superficielles relativement peu épaisses, une dizaine de mètres à peine dans le cas présent.

Le Pz8 présente une anomalie hydraulique (piézométrie anormalement élevée) très probablement due à la proximité immédiate d'un écran hydraulique (ancienne fondation) ou encore à une fuite sur la conduite d'exhaure d'une station de relevage (Figure 18). Par conséquent, il ne sera plus tenu compte des informations fournies par cet ouvrage dans les études ultérieures.

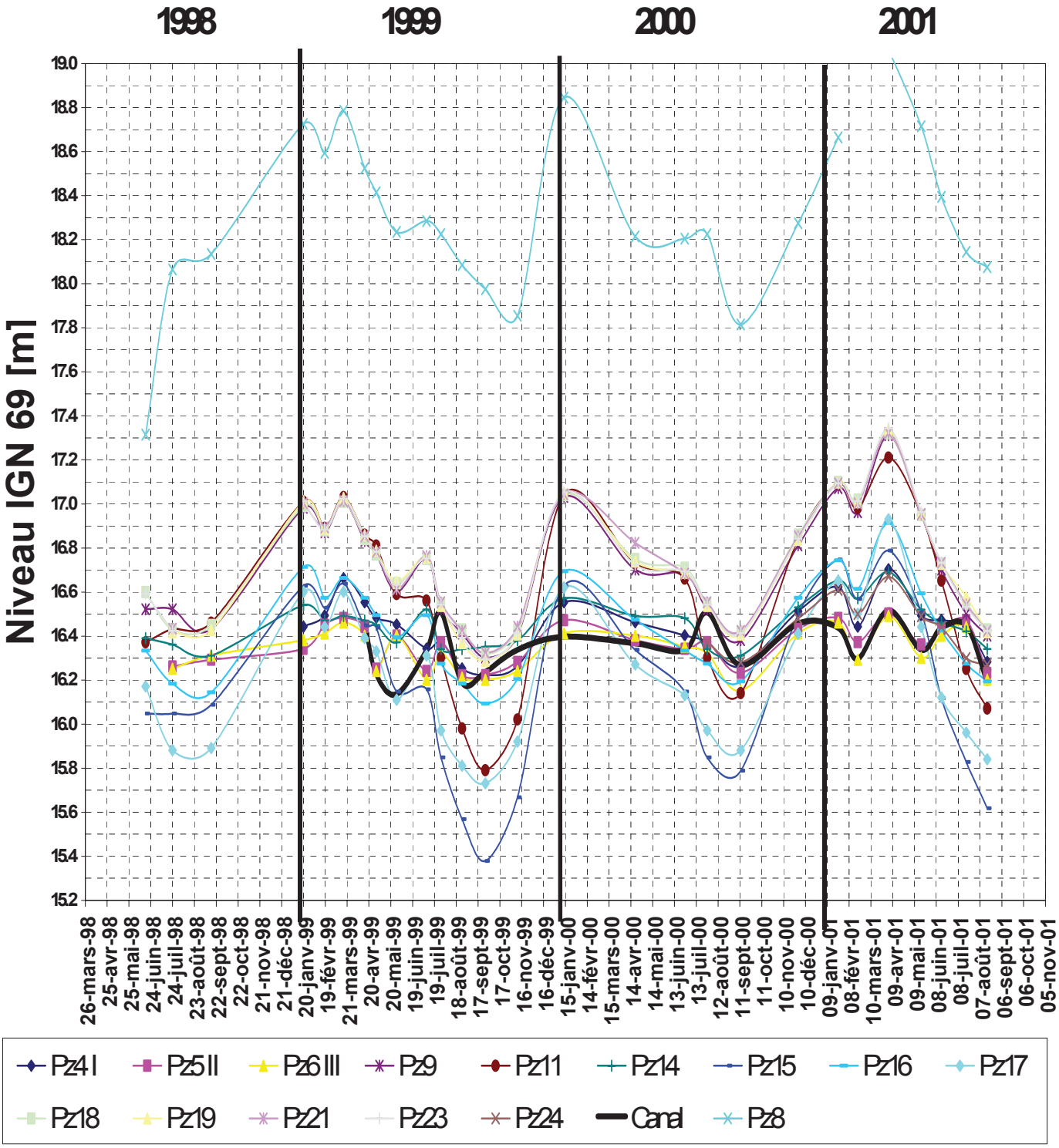


Figure 26 : *Evolution des hauteurs piézométriques de la nappe superficielle (IGN69)*

II.6.2. Influence de la piézométrie sur le transport

Les conditions aux limites de la nappe superficielle du site expérimental jouent un rôle important notamment pour le bord nord-ouest, constitué d'un canal à grand gabarit, à proximité immédiate de l'ancienne cokerie. Son niveau, contrôlé artificiellement par l'écluse aval pour permettre la navigation, est mesuré par une station limnimétrique en même temps que les piézomètres.

La cohabitation d'une variation importante du niveau de la nappe avec le canal, artificiellement maintenu à une hauteur plus ou moins constante, induit des régimes hydrauliques différents entre les périodes de hautes et de basses eaux. La Figure 27 représente une interpolation triangulaire (calcul sur 3 points) de la surface piézométrique de la nappe superficielle sous SIG (Arcview © et Spatial Analyst © d'Esri) pour les plus hautes eaux mesurées, c'est à dire le 13 janvier 2000. On remarque une alimentation du canal par la nappe superficielle selon un écoulement perpendiculaire aux berges.

Ceci confirme les observations sur les concentrations en HAP et BTEX qui laisser supposer un transport des polluants, donc un écoulement de la nappe superficielle, de la zone "source de pollution" vers le canal.

Par opposition, la Figure 28 présente avec le même outil une interpolation de la surface piézométrique pour les plus basses eaux mesurées le 27 septembre 1999. Ici le régime hydraulique s'inverse avec une alimentation de la nappe par le canal et une piézométrie relativement plate (faible écoulement de la nappe) sur une bande de 200-300 m le long du canal comprenant l'emprise de l'ancienne cokerie.

Ces deux figures (Figure 27 et Figure 28) illustrent les cas limites de l'écoulement hydraulique souterrain de la nappe superficielle. Les régimes hydrauliques courants qui régissent le fonctionnement de cet aquifère sont une succession d'états intermédiaires.

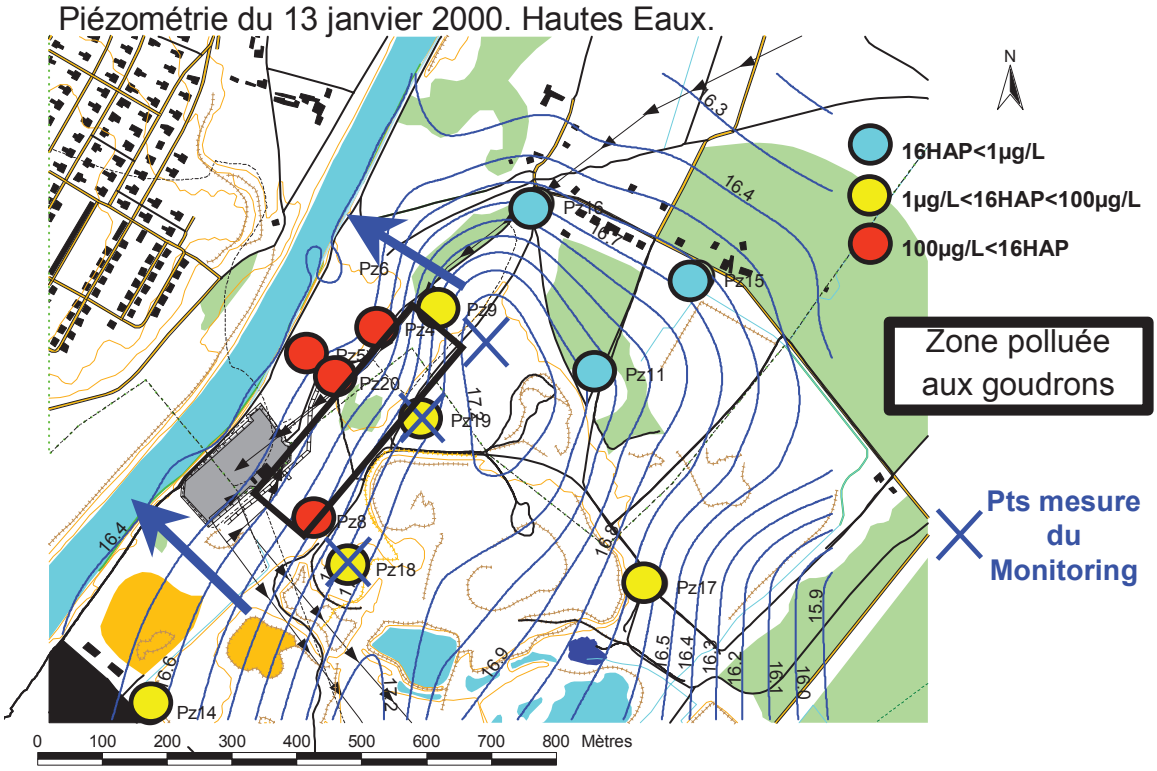


Figure 27 : *Interpolation de la surface piézométrique en hautes eaux (BD Topo © sous SIG Arcview ©)*

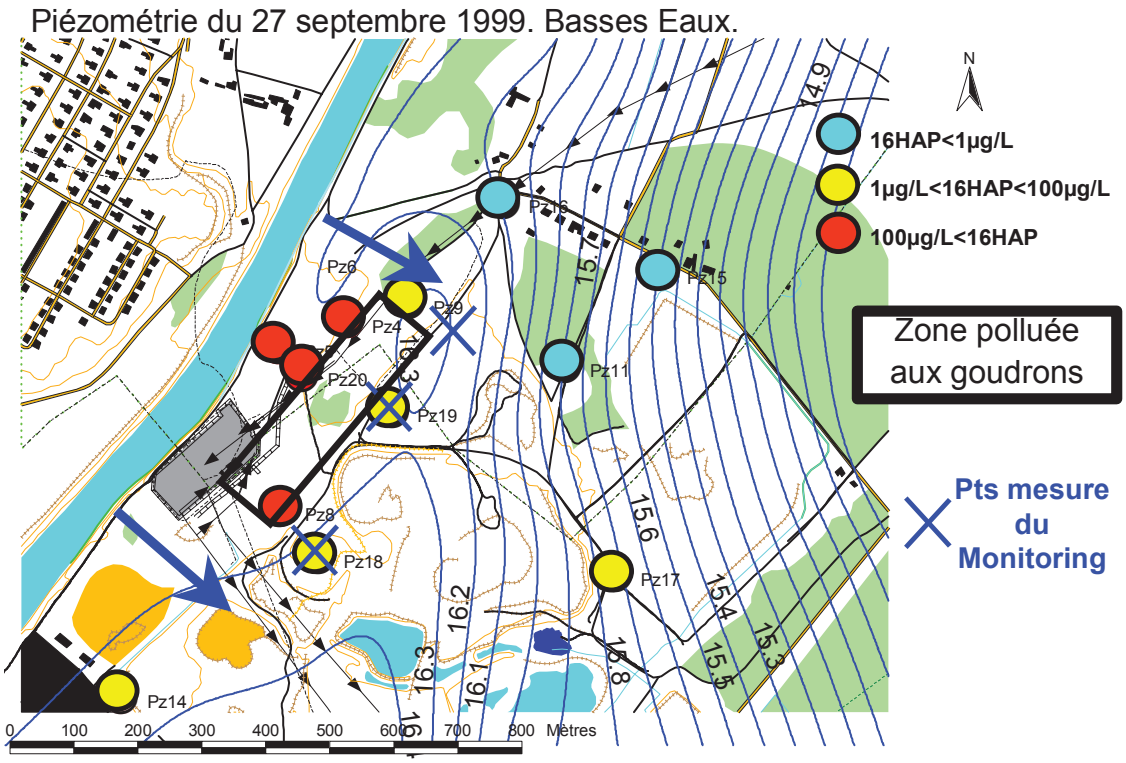


Figure 28 : *Interpolation de la surface piézométrique en basses eaux (BD Topo © sous SIG Arcview ©)*

II.7. Modélisation du transport de la pollution dans la nappe superficielle

L'outil de modélisation permettra de simuler le fonctionnement hydrodynamique de la nappe en fonction des caractéristiques du sol et des pluies. Associé à un module de transport de polluants, il sera ainsi possible de modéliser le fonctionnement hydrodispersif de l'aquifère superficielle pour une pollution au naphtalène. En effet, la naphtalène est le composé caractéristique de la source de pollution comme l'ont montré les investigations sur le terrain. De plus, étant le plus soluble des HAP, il devrait migrer le plus loin. Les résultats de cette simulation doivent guider le choix du positionnement des points de mesures de l'instrumentation.

II.7.1. Objectifs

Le but recherché au travers de la modélisation est de quantifier le transport du naphtalène dans la nappe superficielle soumis aux écoulements souterrains. Cette connaissance permettra de connaître l'expansion de la pollution résultant de l'activité de la cokerie dans le temps et l'espace (pollution historique au goudron). Les processus à prendre en compte sont l'écoulement de la nappe superficielle, la géologie du milieu, les phénomènes hydrodispersifs (transport de solutés solubles) et l'hydrochimie incluant la volatilisation, la solubilité, l'adsorption/désorption et la biodégradation. L'échelle choisie pour une telle étude la totalité du site expérimental d'environ 1km² comprenant l'emprise de la cokerie. La durée à prendre en compte est le siècle, ce qui correspond au temps écoulé depuis la mise en service de la cokerie. La précision recherchée s'apparente à une approche qualitative. En effet, on s'intéresse plus à l'expansion de la pollution qu'à son degré de contamination. On recherchera bien une répartition spatiale des concentrations mais sans garantir un grand niveau de précision compte tenu des moyens limités (nombre de piézomètres, outil, investigations, etc…). Les paramètres qui alimenteront le modèle seront les caractéristiques des couches géologiques saturées entre la surface de la nappe superficielle et son substratum, l'identification de la source de pollution, les propriétés chimiques du naphtalène, les conditions de charges aux limites responsables de l'écoulement, les échanges avec le canal et la pluviométrie.

II.7.2. Choix du modèle

Le modèle doit prendre en compte la nature du polluant, l'hétérogénéité du site constitué de plusieurs couches géologiques variables dans l'espace, les frontières du domaine avec leurs conditions limites, le fonctionnement hydrologique du site, etc..

Il faut donc un modèle qui soit suffisamment générique pour être à la fois simple d'utilisation et facilement transposable à l'étude d'autres sites. L'approche plus qualitative que quantitative permet l'utilisation d'outil commercial (progiciel) pour la modélisation du transport de polluant dans les nappes (c'est à dire des logiciels du commerce ayant des références opérationnelles). La sélection s'est faite suivant les fonctionnalités supportées par le code de calcul selon plusieurs critères dont : la dimension (3D), l'écoulement (au moins eau-huile, soit diphasique), l'hydrodispersion (convection, diffusion, dispersion) , l'hydrochimie (adsorption, biodégradation, dissolution) et la plate-forme informatique (PC car nécessité de portabilité).

Le bilan de cette sélection pour la modélisation du transport des HAP dans les sols d'anciens sites d'activités de la pyrolyse du charbon est présenté dans le rapport CNRSSP n°97/04 *[BARBE, 1997]*. Les modèles retenus sont ceux traitant des écoulements et du transport de systèmes polyphasiques (cas des HAP) en 3D et en zone saturée.

Il s'agit des produits suivants :

- SIMUSCOPP (SIMUlation des Sites COntaminés par des Produits Pétroliers) développé dans le cadre d'un projet EUREKA RESCOPP par l'IFP, le Burgeap et les sociétés italiennes du groupe ENI (www.burgeap.fr) (France) ;
- UTCHEM de l'Université du Texas (www.intera.com/technology/utchem.html)(Austin, USA) ;
- MARTHE du BRGM (www.brgm.fr) (France) ;
- FEFLOW de Wasy (www.wasy.de) (Allemagne).

Parmi ces 4 outils présélectionnés, le choix s'est porté sur l'utilisation du modèle FEFLOW développé par WASY (Allemagne). Des considérations pratiques et la prise en compte d'autres projets développés au CNRSSP ont également compté dans la décision finale.

II.7.3. Description de Feflow

Feflow © (Finite Element subsurface FLOW system) a été créé en 1979, et depuis poursuit son évolution. Le code est utilisé de par le monde en tant que modèle à l'usage des universités, des instituts de recherche, des organismes gouvernementaux et des bureaux d'étude.

Le logiciel **Feflow** © utilisé dans ce projet, utilise les résolutions d'équations de l'hydrodynamique (conservations de la masse du fluide et de Darcy) par la méthode des éléments finis pour modéliser en 2D et 3D le transport de polluant en milieu saturé ou non saturé en prenant en compte des phénomènes d'adsorption et de biodégradation *[DIERSCH, 1998]*. La discrétisation du domaine se fait à l'aide d'un maillage triangulaire en 2D auquel s'ajoute la troisième dimension en fonction des couches hydrogéologiques. Les conditions aux limites, les paramètres hydrogéologiques ainsi que la description du polluant sont déduits de la caractérisation du site. Le principe de résolution intègre les phénomènes d'adsorption et de biodégradation dans le calcul du transport de polluants. Les interfaces de communication autorisent les données cartographiques géoréférencées ; elles sont donc compatibles avec un Modèle Numérique de Terrain (et un SIG) *[DIERSCH et al., 1995; DIERSCH, 1996]*. Les autres échanges se font suivant un protocole classique : des fichiers texte de type ASCII.

La démarche pour l'élaboration et l'exploitation du modèle est la suivante :

- Choix des paramètres de résolution des équations ;
- Discrétisation (élaboration du maillage) du domaine d'étude en fonction des paramètres géologiques et hydrogéologiques de terrain ;
- Calage de la piézométrie en fonction des pluies et des conditions limites par simulations hydrodynamiques en relation avec la piézométrie observée en 1999 ;
- Simulations du transport en milieu saturé en eau du naphtalène.

II.7.4. Résolution des équations

Les équations qui régissent le modèle sont basées sur le principe de la conservation de la masse et de l'énergie. Le résultat est obtenu par résolution du système suivant en 2 et 3 dimensions.

$$\left[S_o.s^f(\Psi)+\varepsilon.C(\Psi)\right]\frac{\partial h}{\partial t}+\nabla.q=Q_h \tag{1}$$

$$q=-K_r(s^f)K\frac{\mu_0^f}{\mu^f(C,T)}\left(\nabla h+\frac{\rho^f-\rho_o^f}{\rho_o^f}e\right) \tag{2}$$

$$s^f(\Psi)R_d(C)\frac{\partial C}{\partial t}+q.\nabla C-\nabla.\left[(\varepsilon s^f(\Psi)D_d I+D).\nabla C\right]+s^f(\Psi)R(C)\vartheta C=Q_C \tag{3}$$

avec :

C	=	*concentration et concentration de référence des espèces chimiques miscibles ;*
D	=	*tenseur de dispersion mécanique ;*
D_d	=	*diffusion moléculaire en milieu poreux ;*
e	=	*coefficient de pesanteur ;*
g	=	*accélération de la pesanteur ;*
h	=	*charge hydraulique ;*
I	=	*vecteur unité ;*
K	=	*coefficient de perméabilité en milieu saturé ;*
K_r	=	*conductivité hydraulique relative ($0 < K_r \leq 1$; $K_r = 1$ si saturé, soit $s^f=1$) ;*
Q_h	=	*débit de transfert de débit milieu/source ;*
Q_C	=	*débit massique du transfert milieu/source ;*
q	=	*vecteur de flux selon Darcy ;*
R, R_d	=	*retard et retard dérivé, respectivement ;*
s^f	=	*saturation de la phase liquide ($0 < s^f \leq 1$; $s^f = 1$ en milieu saturé) ;*
S_o	=	*saturation initiale (t=0) ;*
T	=	*température ;*
ε	=	*porosité ($0 < \varepsilon \leq 1$) ;*
ϑ	=	*taux de dégradation chimique et de dégradation biologique ;*
μ^f, μ_0^f	=	*viscosité dynamique et viscosité dynamique du fluide de référence (eau) respectivement ;*
ρ^f, ρ_o^f	=	*masse volumique du fluide et masse volumique du fluide de référence respectivement ;*
t	=	*temps ;*
Ψ	=	*pression de charge (Ψ >0 milieu saturé, Ψ <0 milieu non saturé).*

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre le système d'équation (1) à (3) en 3 et 2 dimensions. La discrétisation spatiale est basée sur des éléments triangulaires en 2D et des pentaèdres en 3D.

Le principe de calcul utilisé ici modélise le comportement hydraulique du site et le transport de polluant en régime transitoire avec un pas de temps automatique de 1er ordre régulé par des critères de convergence et d'erreur.

II.7.5. Discrétisation de la zone d'étude

La surface d'étude d'environ 1 km² a été discrétisée par un maillage triangulaire 2D géoréférencé de 25000 éléments et 15000 nœuds avec un affinement supérieur aux points de références (piézomètres, sources de pollution, etc…). Le nombre d'éléments peut paraître important par rapport à la surface et aux objectifs initiaux de la modélisation plutôt qualitative. Toutefois, il permet à terme une exploitation plus fine (quantitative) notamment lors de l'éventuel suivi de la réhabilitation (en perspective du Monitoring Continu de Site). La troisième dimension est constituée des strates géologiques de la nappe superficielle (zone saturée) en subdivisant les couches de tourbe/sables fins et de graves pour ne pas avoir de couches trop épaisses et favoriser la précision du calcul. Les profondeurs sont issues des informations fournies lors de l'installation des piézomètres. Il a été fait abstraction de la couche de sol non saturée, constituée de remblai (3-4 mètres d'épaisseur) puisque la pollution a déjà atteint la nappe et que c'est sa progression au sein de celle-ci qui nous préoccupe. L'outil de modélisation calculera l'hydrodynamique et le transport du naphtalène avec une discrétisation de la zone d'étude composée d'un maillage triangulaire (2D) plus 5 couches (pour la troisième dimension) dont la dernière (le substratum) sera considérée comme imperméable (rappel de la coupe géologique type du site sur la Figure 14 et transcription sur Feflow sur la Figure 29) :

- tourbe/sable
- tourbe/sable
- grave
- grave
- et le substratum argileux (argile de Louvil).

Les épaisseurs des couches varient dans l'espace. L'étude des différents rapports de perforation des piézomètres a fourni les profondeurs en différents points à partir desquels a été déduites par interpolation linéaire la forme des couches. La discrétisation en 2 sous couches permet de réduire la hauteur des pentaèdres et va donc dans le sens d'une meilleure précision de calcul par rapport à un système bi-couche (tourbe/sable et grave). Cette manipulation s'est avérée indispensable lors du calage hydrodynamique, le système bi-couches ne pouvant converger vers une simulation acceptable (voir ci-après).

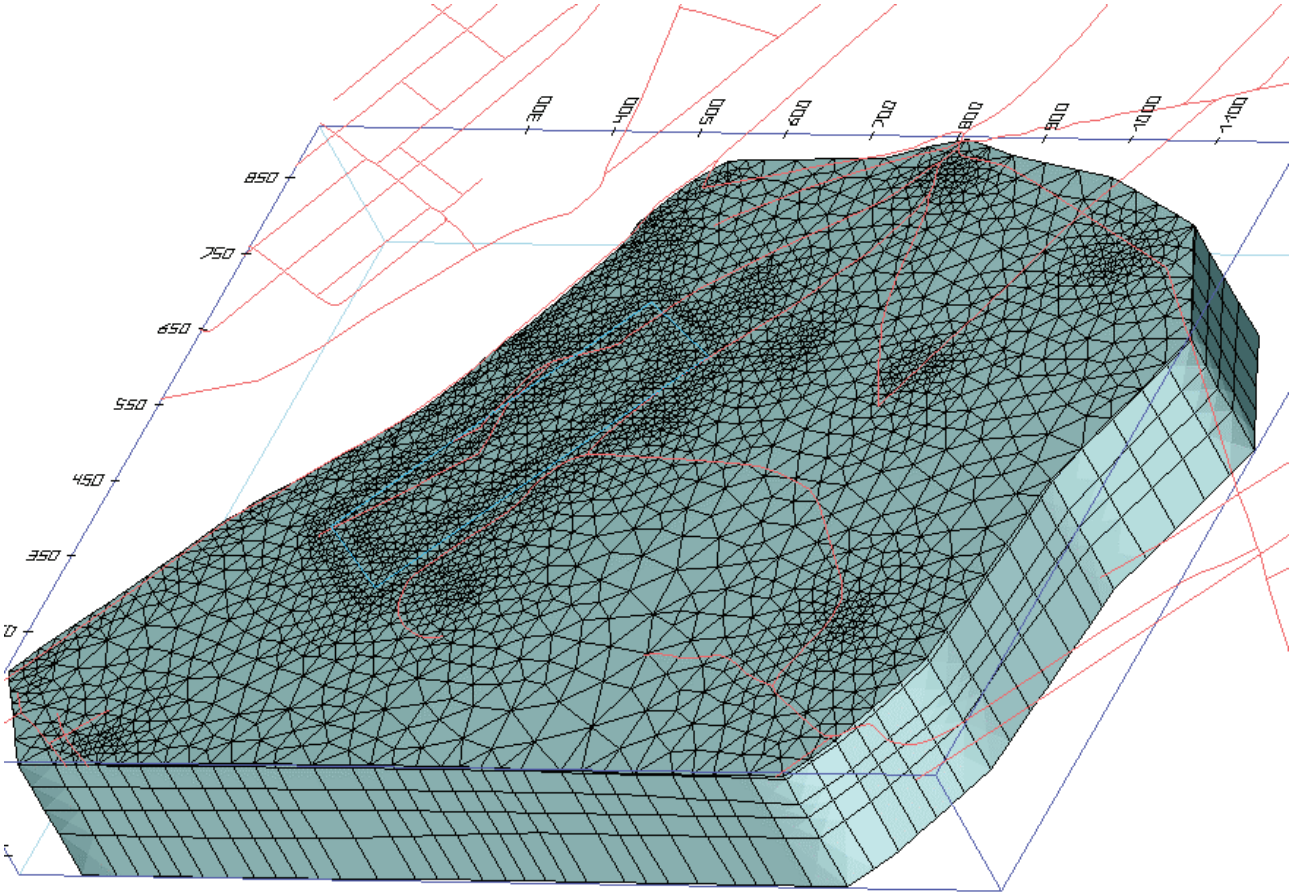


Figure 29 : *Discrétisation 3D sous Feflow ©. Les traits fins rouges représentent les voies de communication (de part et d'autre du canal) et le substratum n'est pas représenté*
1ère (peu épaisse) et 2ème couche : tourbe/sable
3ème et 4ème couche : grave
5ème couche : substratum argileux

II.7.6. Modélisation hydrodynamique

Avant d'aborder la simulation du transport de polluant, il faut au préalable que le modèle soit correctement calé au niveau hydrodynamique. Cela a été réalisé à l'aide de données piézométriques et pluviométriques disponibles permettant ainsi l'ajustement des paramètres hydrogéologiques des différentes couches.

II.7.6.1. Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques qui caractérisent le site d'étude ont été définis à partir des essais *in situ*, des références régionales provenant de sites analogues *[INERIS, 2000]*. La validation de ces données essentielles a été faite à partir de régimes permanents stabilisés fictifs avec pluie constante correspondant aux hautes et basses eaux.

Pour les 3 horizons géologiques constituants les 5 couches du modèle les ordres de grandeurs retenus proviennent du rapport INERIS en Annexe 10. Après calage (II.7.7, p76) les valeurs définitives sont :

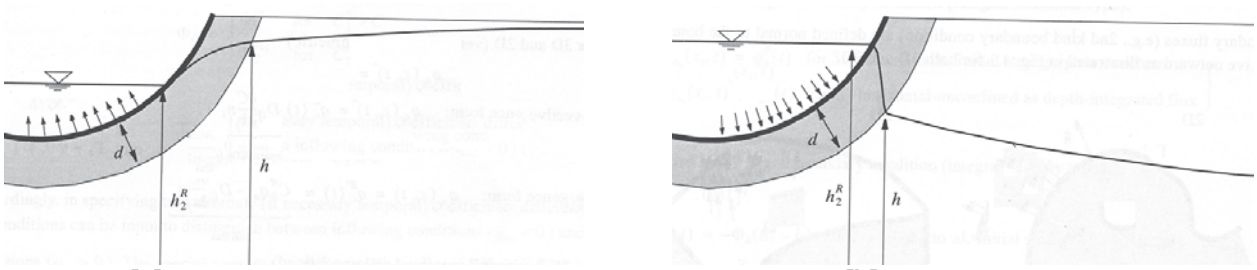
- tourbe/sable, couche 1 et 2:
  - épaisseur variable (1,5 m en moyenne) ;
  - conductivité hydraulique isotrope de 1.10^{-4} m/s ;
  - porosité cinématique (coefficient d'emmagasinement) de 0,09 ;

- grave, couche 3 et 4 (horizon productif) :
  - épaisseur variable (2 men moyenne) ;
  - conductivité hydraulique isotrope de 5.10^{-4} m/s ;
  - porosité cinématique (coefficient d'emmagasinement) de 0,2 ;

- substratum argileux, couche 5 (argile de Louvil) :
  - épaisseur 4m
  - conductivité hydraulique isotrope de 1.10^{-9} m/s ;
  - porosité cinématique (coefficient d'emmagasinement) de 0,03.

II.7.6.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont des conditions de charges hydrauliques (piézométrie) avec un retard au niveau des berges du canal en raison du transfert nappe/canal (Figure 30). Ces conditions de transfert, vraisemblablement très hétérogènes sur le linéaire de berge (succession de palplanches, enrochements, talus artificiel, etc…), sont difficilement quantifiables. Il a donc été retenu l'hypothèse la plus défavorable en retenant des paramètres relativement élevés, ce qui a pour conséquence d'atténuer considérablement la fonction retard au profit de conditions de charges hydrauliques classiques. Cette approximation défavorable n'aura que peu d'incidence sur la modélisation hydrodynamique mais exagérera le transfert de polluant entre le canal et la nappe superficielle.



[a] **[b]**

Figure 30 : *Conditions de transfert à l'interface canal/nappe superficielle*
h : charge de la nappe
h_2^R : charge du canal
d : épaisseur de la zone de transfert
[a] hautes eaux *[b] basses eaux*

L'application a été conduite sur un domaine fini correspondant à la zone d'étude longeant le canal, soit 1km² environ. Les conditions limites appliquées sont une condition de transfert avec le canal plus des conditions de charges hydrauliques sur le reste du contour reproduisant fidèlement le mouvement alterné de la nappe superficielle.

Pour cela, une année type a été choisie parmi les 3 années d'observation pour constituer une approximation représentative de la piézométrie du siècle passé. L'année 1998 étant incomplète, les années 2000 et 2001 anormalement pluvieuses (au-dessus des moyennes généralement observées), c'est l'année 1999 avec une hauteur de canal moyenne de 16,3 m qui a été retenue. La Figure 31 montre les niveaux piézométriques de l'année 1999, relevés tous les mois environ, avec une incertitude de ± 1 cm. Bien qu'il soit impossible de connaître avec certitude l'évolution de la piézométrie entre 2 mesures, il a été décidé de relier les points pour des raisons de lisibilité.

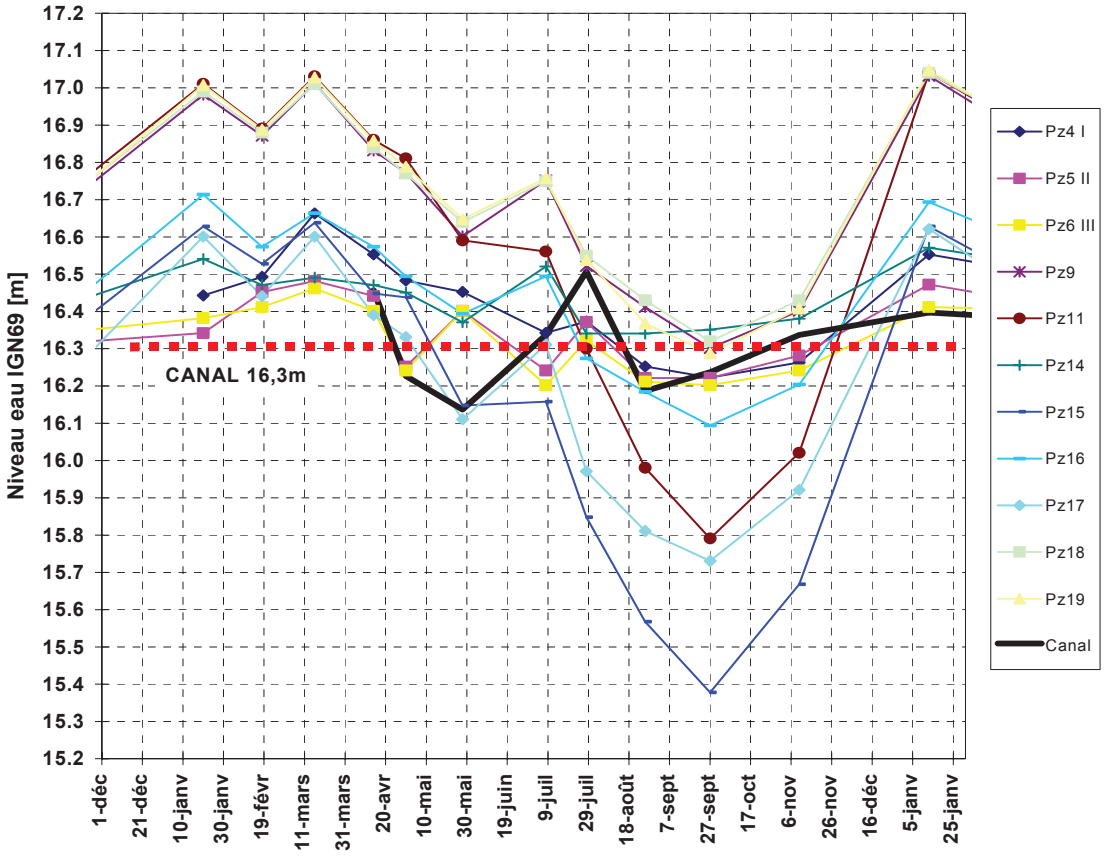


Figure 31 : *Niveaux piézométriques de la nappe superficielle pour l'année 1999 (IGN69) (attention, pour des raisons de lisibilité les points de mesures sont reliés par des traits). Les Pz20 et Pz22 très pollués (goudron pur) ne sont pas suivis Le Pz8 est enlever en raison de son dysfonctionnement*

1999 étant l'année de référence, elle servira de modèle pour la simulation. Les conditions aux limites extrapolées des conditions piézométriques de 1999 seront donc utilisées en boucle pour reproduire les variations cycliques de la nappe. Si la hauteur du canal a été considérée stable (16,3 m), la modélisation hydrodynamique tient ainsi compte des inversions saisonnières des écoulements souterrains. En effet, à partir des relevés périodiques des piézomètres du site, les charges hydrauliques ont été extrapolées en chacun des points du contour de la zone d'étude (Figure 32) à l'aide de la méthode de régionalisation "Akima" basée sur 4 points voisins *[AKIMA, 1970]* : la méthode d'interpolation d'Akima en 2D consiste à trouver une portion de courbe cubique entre 2 points de telle manière que la courbe passe par les points et que la tangente en chacun de ces points soit seulement déterminée par 2 points avant et 2 points après. Pour la frontière avec le canal, la condition de charge retenue est de 16,3 m.

La Figure 32 montre la fenêtre FEFLOW de programmation des conditions limites : condition de transferts le long de la berge du canal (charge de 16,3 m plus un retard de transfert canal/nappe) et de charges sur le reste du contour de la zone d'étude. Pour ces dernières, la Figure 32 détaille pour un point la représentation graphique de la charge imposée. Toutes ces fonctions sont cycliques et de période 365 jours.

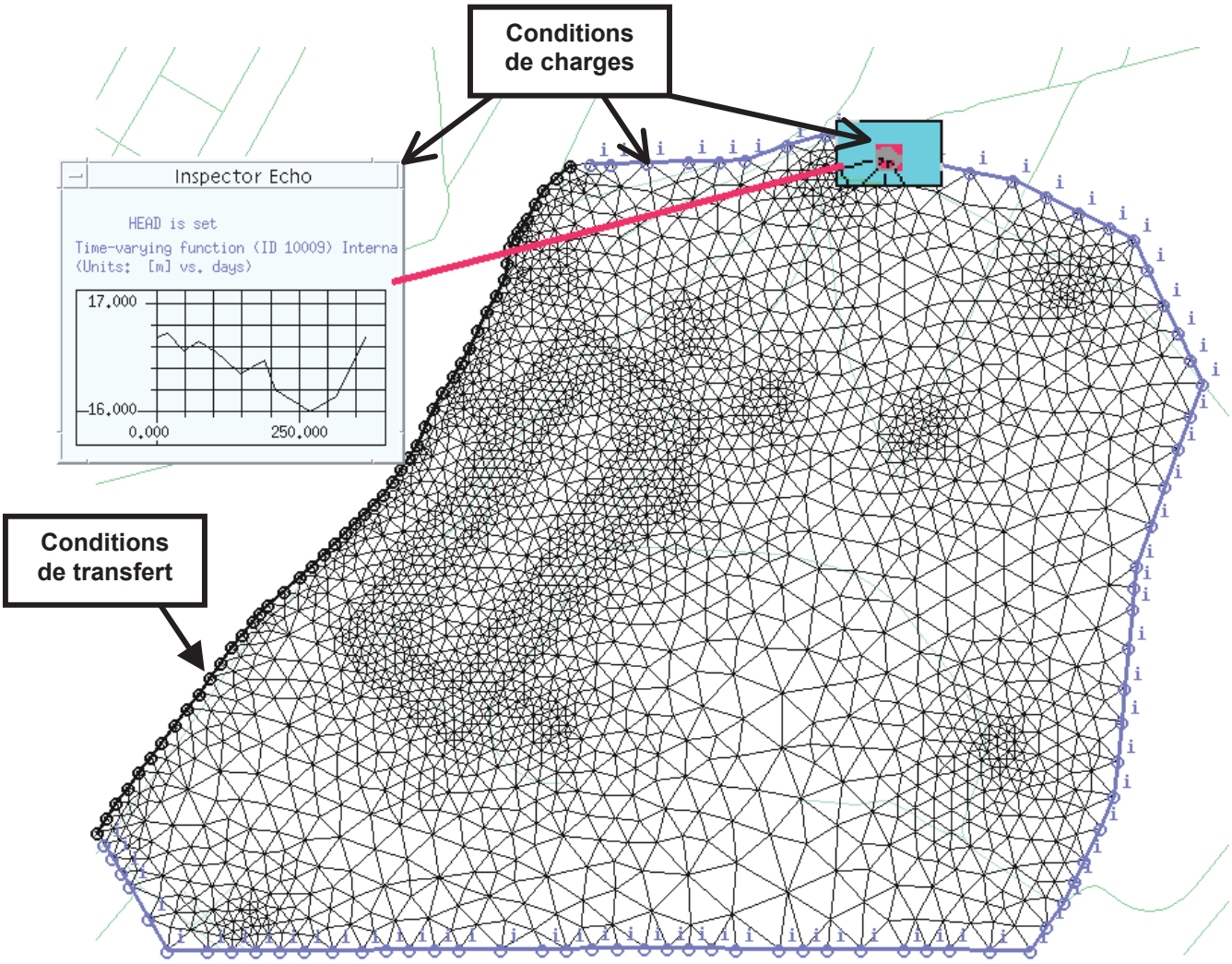


Figure 32 : *Conditions limites de transfert sur la berge du canal et conditions limites de charge hydraulique cyclique pour les autres points du contour*

II.7.6.3. Condition initiales

Les conditions initiales retenues sont issues des relevés piézométriques effectués lors du suivi du site. Les valeurs exactes n'ont pas vraiment d'incidence puisque après quelques itérations le système n'obéit plus qu'aux lois de l'hydrodynamique indépendamment des conditions initiales. Des valeurs trop irréalistes induiraient un temps de convergence plus long.

II.7.6.4. Pluie efficace

La partie efficace (Figure 33) de la pluie [PE] est le volume d'eau qui participe à la réalimentation de l'aquifère, soit la pluie totale [P] diminuée de l'évapotranspiration réelle (végétaux) [ETR] et/ou l'évaporation (eau de surface). La pluie efficace se répartit en infiltration et ruissellement.

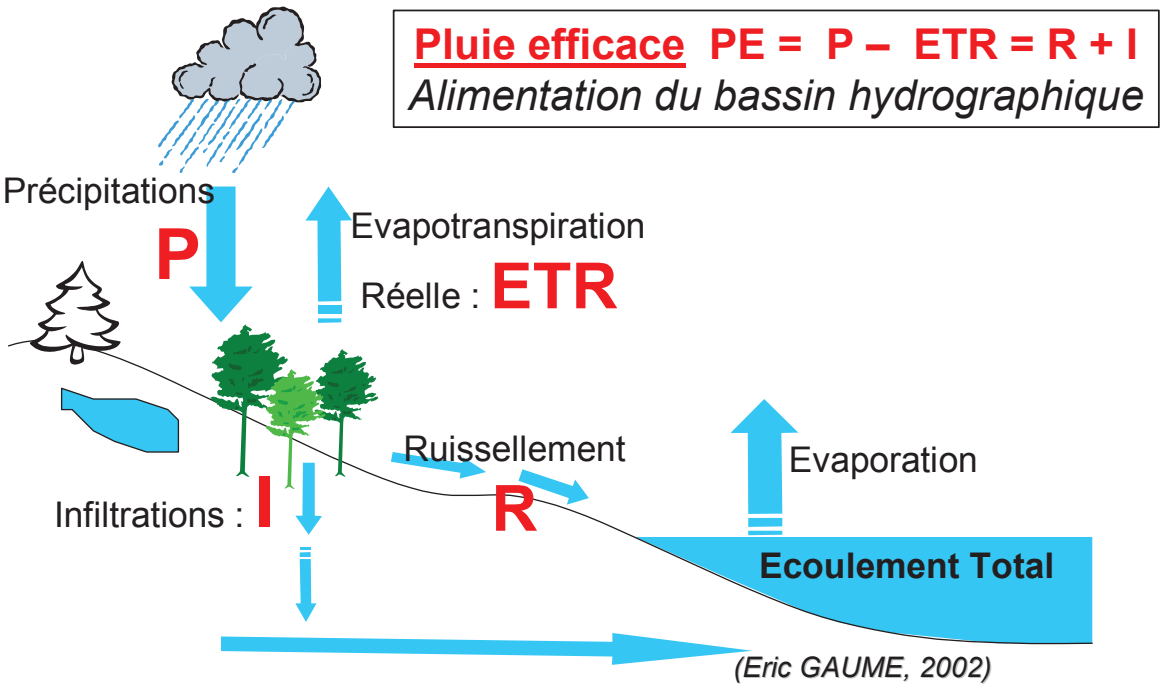


Figure 33 : *Bilan hydrique des pluies (d'après Gaume, 2002)*

Les précipitations ont beaucoup d'influence sur le comportement hydrodynamique des nappes superficielles peu épaisses comme c'est le cas ici.

La pluviométrie réelle (précipitation) de l'année 1999, année de référence pour la modélisation, a été déduite des acquisitions du bulletin de situation hydrologique du bassin Artois Picardie diffusé par l'Agence de l'Eau http://www.eau-artois-picardie.fr/bassin/index.htm. La station retenue est celle de Lambertsart en région Lilloise, située à une cinquantaine de kilomètres du site d'étude. On supposera que cet éloignement a peu d'incidence et que la variabilité spatiale des moyennes mensuelles de pluies est faible entre Lille et Valenciennes.

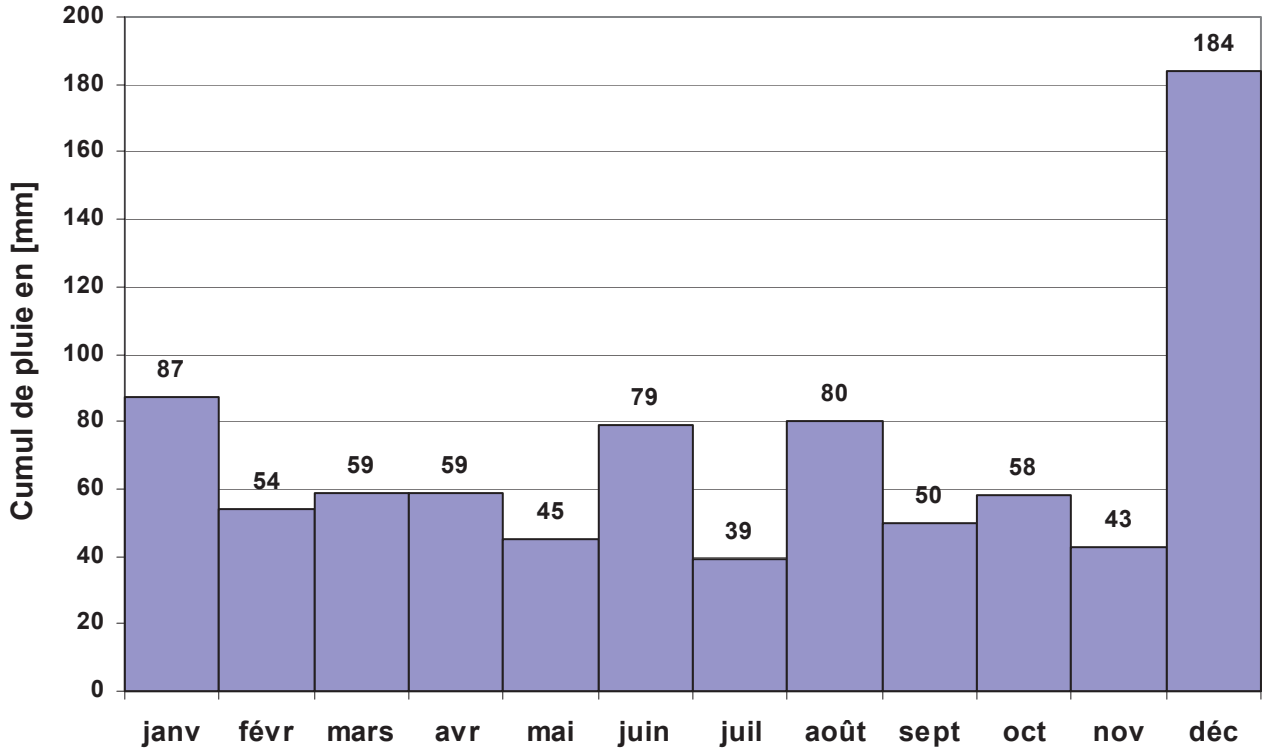


Figure 34 : *Pluviométrie de l'année 1999 - station Lambersart-59 (d'après Agence Eau Artois Picardie)*

La Figure 34 présente les précipitations mensuelles à de la station de Lambersart au cours de l'année 1999. Afin de bien traduire le fonctionnement cyclique de l'aquifère, la pluviométrie de référence a été déduite de ces 12 moyennes mensuelles auxquelles il a fallu ne retenir que la partie active (pluie efficace) dépendante de l'ensoleillement et de la végétation. Les différences entre les précipitations totales et les quantités d'eau qui s'infiltrent réellement pour alimenter l'aquifère sont essentiellement dues à l'évapotranspiration réelle de la végétation de surface (ETR, plus de 50% de la pluie totale) : la faible déclinaison du terrain n'engendre pas de ruissellement de surface. Les valeurs sont ensuite intégrées sous Feflow (Figure 35) comme une fonction cyclique du temps sur une période de 365 jours. Le calage de la modélisation hydrodynamique se fera notamment sur l'estimation de l'ETR mensuelle.

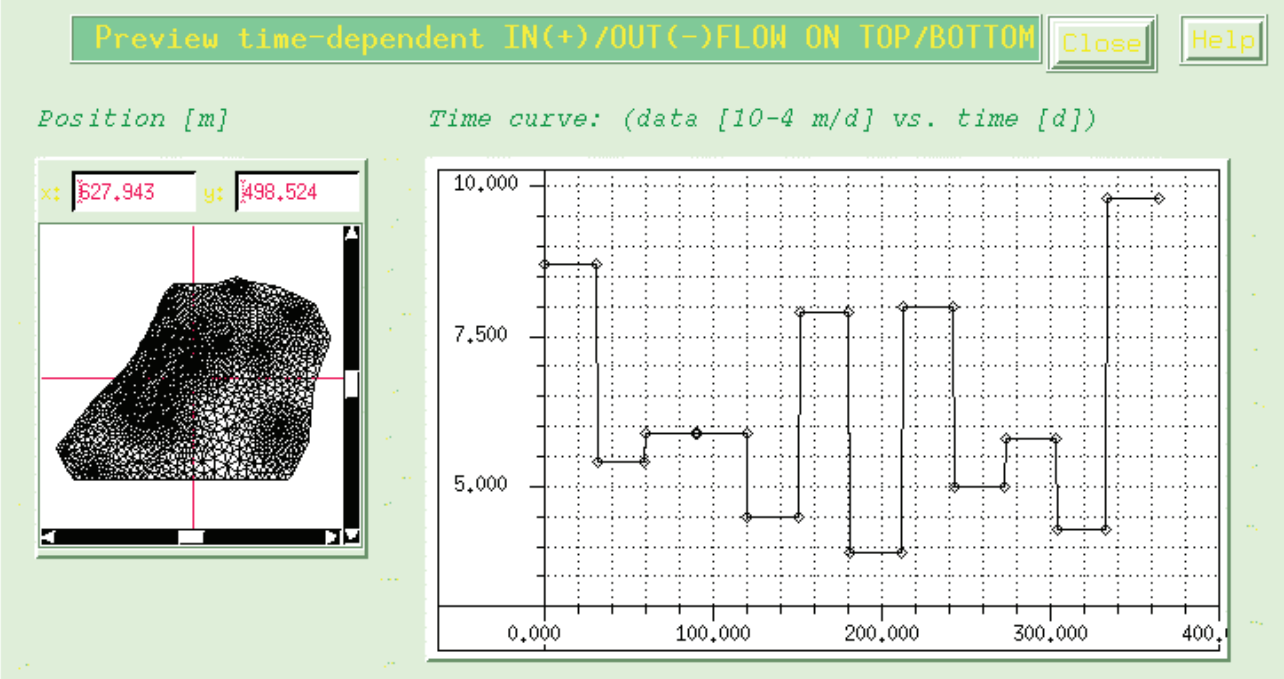


Figure 35 : *Répartition de la pluie efficace en moyennes mensuelles sous Feflow ©*

II.7.7. Calage

II.7.7.1. Méthodologie

Le calage s'est fait en deux étapes :

Tout d'abord, les paramètres hydrodynamiques ont été affinés à partir des régimes stabilisés fictifs (pluie constante) des hautes et basses eaux de façon à obtenir la meilleure correspondance entre les hauteurs d'eau mesurées aux piézomètres et celles calculées par Feflow (simulation hydrodynamique pour les hautes et basses eaux).

Ensuite, intervient l'ajustement de la pluie efficace par ajustement de l'ETR pour obtenir une simulation de l'évolution des niveaux piézométriques qualitativement similaire à leurs évolutions réelles.

II.7.7.2. Première étape : calage des paramètres hydrauliques

Le calage a d'abord consisté en affinant les paramètres hydrauliques avec une approche de la pluie efficace pour les deux situations hydrauliques extrêmes les hautes eaux (comme janvier 2000-Figure 27) et les basses eaux (comme septembre 1999 - Figure 28). Pour chaque état, les hauteurs piézométriques mesurées permettent d'interpoler les conditions aux limites (méthode Akima) puis une simulation est lancée en régime permanent stabilisé. Après stabilisation, les hauteurs piézométriques calculées par le logiciel sont comparées aux hauteurs piézométriques mesurées sur le terrain. Par tâtonnement en agissant sur les paramètres hydrogéologiques, le modèle hydrodynamique a été calé avec comme critère de convergence la moyenne des carrés de la différences entre les hauteurs piézométriques mesurées et simulées.

Le Tableau 10 montre la comparaison des valeurs relevées en septembre 1999 avec les résultats de la simulation pour 50 mm de pluie efficace par an uniformément répartie dans le temps.

Tableau 10 : *Comparaison des résultats pour les basses eaux*

Piézomètres	Hauteurs piézométriques mesurées	Hauteurs piézométriques simulées	Différence
4	17.11	16.20	0.91
5	15.32	16.23	0.91
6	16.23	16.23	0.00
8	17.97	16.24	1.73
8 interpolé	*16.30*	*16.27*	*0.03*
9	16.31	16.15	0.16
11	15.80	15.83	0.03
14	16.35	16.35	0.00
15	15.38	15.50	0.12
16	16.11	16.11	0.00
17	15.75	15.73	0.02
18	16.32	16.23	0.09
19	16.28	16.14	0.14
20	15.67	16.22	0.54
21	16.32	16.23	0.09
22	15.64	16.21	0.57
23	16.29	16.14	0.15
		Moyenne des carrés avec Pz8	**0.34**
		Moyenne des carrés avec Pz8 interpolé	**0.15**

Le piézomètre 8 est le seul piézomètre où les valeurs mesurées et calculées ne sont pas du même ordre. Ceci confirme l'anomalie déjà citée précédemment lors des investigations (fuite sur la conduite de la station de relevage passant à proximité et/ou écran hydraulique généré par un ouvrage de fondation proche) et nous conforte dans le fait de ne pas tenir compte de cet ouvrage. Une interpolation linéaire (méthode Akima) permet de calculer une valeur interpolée pour le Pz8, et de renouveler la même démarche que précédemment : calculs des conditions aux limites par interpolation puis simulation. Les résultats sont présentés dans le même tableau.

Les valeurs interpolées puis calculées sur le piézomètres 8 sont identiques à 3.10^{-2} m près. La même démarche a été faite avec les hautes eaux. Le calage est jugé satisfaisant et donne une idée du minimum (50 mm/an) et du maximum (150 mm/an) de pluie efficace.

Avec une précision de ± 1 cm sur les relevés piézométriques et une imprécision sur l'estimation des caractéristiques hydrogéologiques du sol, il est raisonnable d'accorder une confiance de ± 16 cm à ces résultats. 4 piézomètres (Pz4, Pz5, Pz20 et Pz22) se détachent nettement avec un écart respectivement de 91 cm, 91, cm, 54 cm et 57 cm.. Pour les 2 premiers (Pz4 et Pz5), ils avaient déjà été identifiés comme non fiables suite à leur assèchement lors des pompages (II.5.1, p53). Les Pz20 et Pz22 sont eux des piézomètres très pollués, peut-être implanté dans une poche de goudrons pour le Pz22 qui n'a pas donc pas été équipé (II.4, p43) Leur suivi piézométrique a été arrêté en raison d'une pollution systématique de la sonde limnimétrique. Ils ont toutefois été pris en compte pour le calage.

II.7.7.3. Deuxième étape : ajustement de la pluie efficace

Le calage s'est ensuite poursuivi par ajustement de la pluie efficace de façon à obtenir la meilleure analogie possible entre les hauteurs d'eau mesurées aux piézomètres représentées sur la Figure 31 et celles simulées par Feflow de la Figure 36.

Le calage s'est fait de façon qualitative en ajustant mois par mois les moyennes mensuelles des pluies efficaces [PE] tout en restant dans les mêmes ordres de grandeur que les valeurs déduites des conditions extrêmes : 50 mm/an et 150 mm/an. Ceci revient à l'ajustement mensuel de l'ETR puisque pour une précipitation mensuelle PE = P - ETR.

Les calages des paramètres hydrogéologiques et des pluies donnent maintenant une bonne modélisation du comportement hydrodynamique de l'aquifère, condition indispensable pour introduire le module transport de polluant.

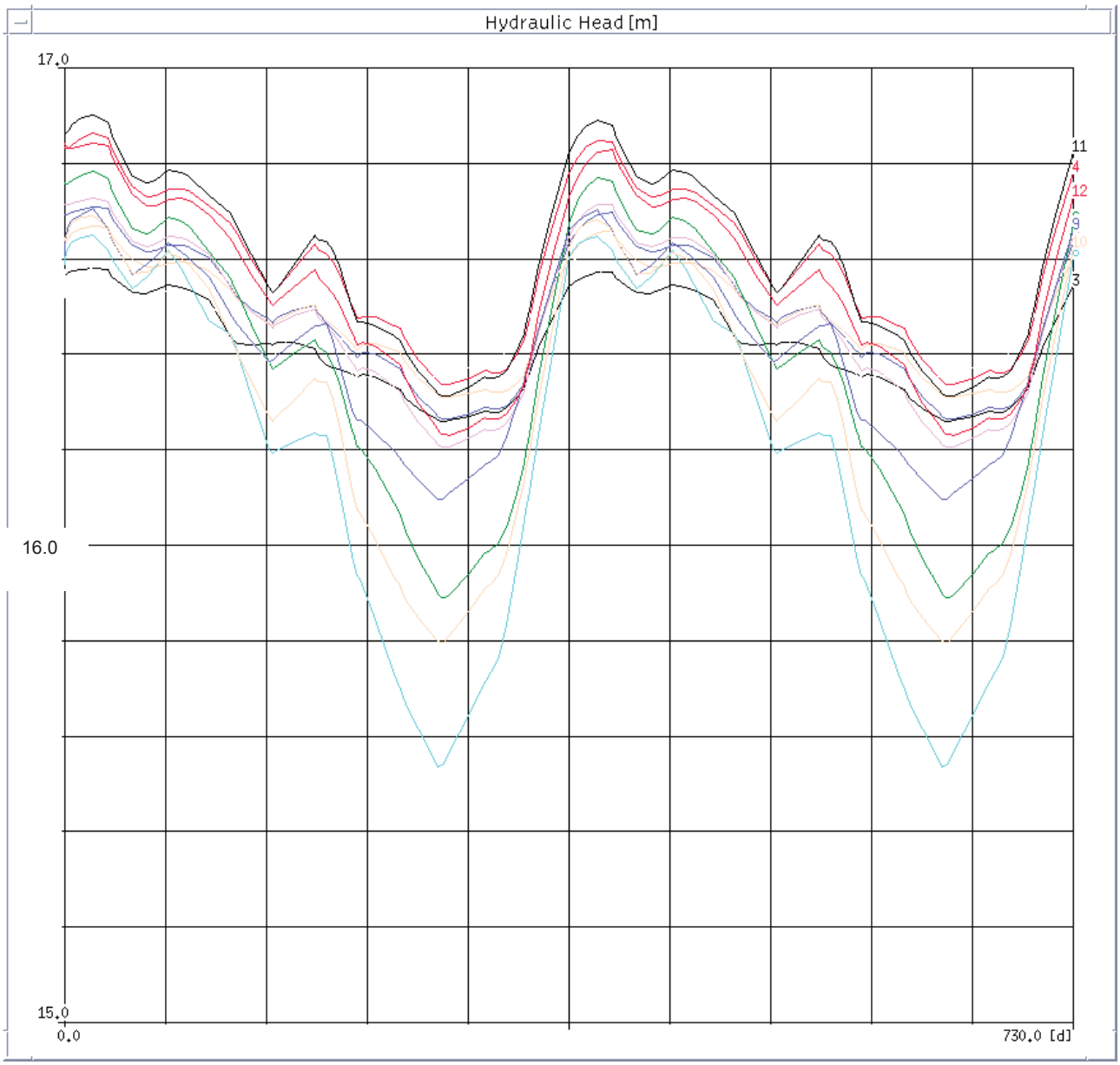


Figure 36 : *Simulation hydrodynamique de l'évolution de la piézométrie sur 2 cycles (2 années)*

II.7.8. Modélisation du transport : cas du naphtalène

L'utilisation du module "transport de polluant" de Feflow ne peut se faire qu'après avoir correctement modélisé et calé l'écoulement. La source de pollution retenue est l'emprise de la cokerie (zone la plus polluante) qui sera considérée comme une source infinie qui diffuse encore aujourd'hui. Il ne sera pas tenu compte des éventuelles autres sources de pollutions.

En terme d'extension spatiale et de masse transportée, il a été retenu les conditions les plus défavorables, c'est à dire le transport du naphtalène (HAP qui se biodégrade le plus : Annexe 2) dans la couche de grave (horizon le plus productif car de perméabilité supérieure aux autres couches géologiques, Annexe 10).

II.7.8.1. Paramètres pour le transport

Les paramètres retenus sont déduits de la bibliographie suite aux études du CNRSSP sur des sites similaires environnants et à d'autres études antérieures comme celles présentées en Annexe 10 *[INERIS, 1999].* Le calage du modèle pour le naphtalène a été réalisé à partir des régimes stabilisés fictifs des conditions hydrologiques extrêmes.

Pour les 3 horizons géologiques constituants les 5 couches du modèle les caractéristiques retenues proviennent de l'Annexe 10 :

- tourbe/sable, couche 1 et 2 :
  - dispersivité longitudinale de 5 m ;
  - dispersivité transversale de 0,5 m ;
  - pas de coefficient d'adsorption (non connu donc valeur 0) ;

- grave, couche 3 et 4 (horizon productif) :
  - dispersivité longitudinale de 20 m ;
  - dispersivité transversale de 2 m ;
  - coefficient d'adsorption de 5,4 ;

- substratum argileux, couche 5 (argile de Louvil) :
  - dispersivité longitudinale de 1 m ;
  - dispersivité transversale de 0,1 m;
  - coefficient d'adsorption de 11.

Les coefficients d'adsorption sont des coefficients d'adsorption linéaires calculés en fonction du coefficient de partage eau-carbone (fourni par l'INERIS), de la quantité de matière organique (estimée à 0,5 ‰ pour les graves), de la masse volumique et de la porosité du sol considéré.

II.7.8.2. Conditions aux limites

La condition aux limites du transport est la concentration en naphtalène au toit de l'aquifère sous la source polluante, soit au vertical de l'emprise de cokerie (cadre noir sur la Figure 19) où les investigations ont confirmé la présence de pollution (Figure 16). Il s'agit d'une concentration d'équilibre dans l'eau du naphtalène calculée en fonction de sa solubilité et de sa proportion dans le mélange d'hydrocarbures initial. En effet, dans un mélange d'hydrocarbures, la concentration d'équilibre de chaque hydrocarbure est fonction de sa solubilité (du corps pur) et de la présence d'autres composés organiques (lois thermodynamiques). La valeur retenue, 3, 8 mg/L, est issue d'investigations sur d'un site similaire proche *[VAN DORPE, 2000]* ayant servi de support pour la comparaison de différents codes de calculs [rapport CNRSSP n° 00/11, *VAN DORPE, 2000*].

Cette condition limite de concentration est une condition permanente imposée au toit de l'aquifère sous l'emprise de la cokerie visualisée sur la Figure 37. Pour le reste, une concentration initiale (en début de simulation) est imposée à 0 mg/l sur l'ensemble du domaine.

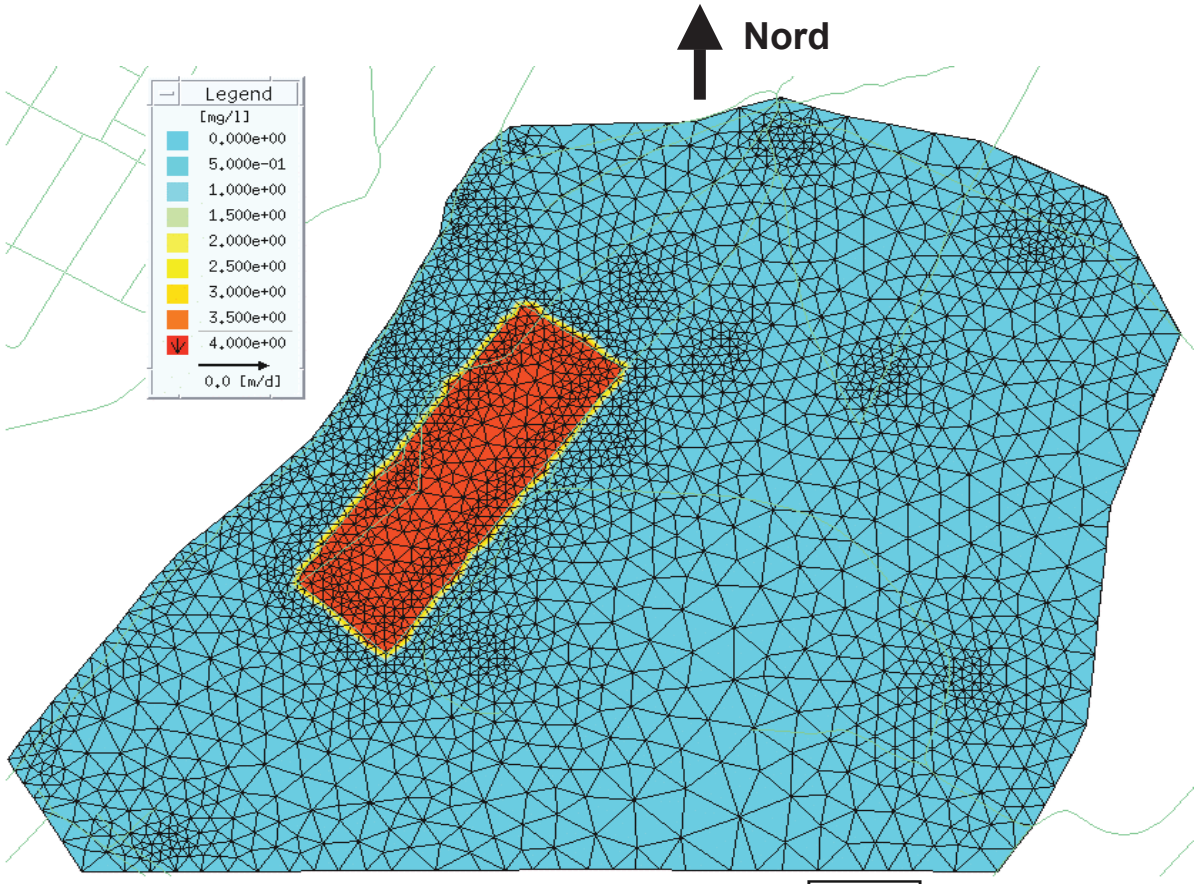


Figure 37 : *Conditions aux limites pour la concentration en naphtalène*

II.7.8.3. Résultats du transport du naphtalène

La pollution date de la mise en service de la cokerie en 1906 et s'est poursuivie pendant toute la phase de production soit jusqu'en 1955. Lors du démantèlement en 1970, tous les volumes de goudrons n'ont pas été entièrement récupérés, des stocks importants perdurent soit en surface ou enfouis sous une couche de remblais, voire dans des fosses enterrées plus ou moins étanches.

Pour la modélisation, l'hypothèse retenue est une source de pollution infinie qui perdure depuis un siècle. Le résultat de la modélisation sur 100 ans correspondrait donc à l'état actuel du site (état utilisé pour le calage du modèle). Une simulation d'un scénario d'évolution future nécessite d'incrémenter le nombre d'années souhaitées aux 100 ans en partant de la situation actuelle.

La modélisation hydrodispersive sur 100 ans sous Feflow © représenté sur la Figure 38, montre le transport dans la couche de la grave (profondeur 5 à 10 m). Le panache de pollution diffuse s'équilibre en une dizaine d'années en considérant une source de pollution infinie (diffusion constante dans le temps). Les concentrations en naphtalène représentées dans le graphe supérieur gauche de la Figure 38, décrivent une "stabilisation sinusoïdale" du transport caractéristique des conditions hydrauliques cycliques de la nappe. Les concentrations ainsi que la forme du panache de pollution sont ainsi stabilisées (seule subsiste une oscillation saisonnière due aux variations des conditions hydrogéologiques) en raison de la dilution du naphtalène, mais les quantités transportées augmentent toujours puisque la source est considérée comme infinie.

Les gradiants hydrauliques affichés sur la Figure 38 ne reflètent pas le caractère alterné de l'hydrodynamique du site. Ils indiquent uniquement les flux hydrauliques à la fin de la modélisation, soit le 365ème jour de la 100ème année.

Cette modélisation représente la diffusion sur le site expérimental d'une seule source polluante : l'emprise de la cokerie considérée comme infinie. Le km² du site expérimental possède inévitablement d'autres sources (stockage goudrons, stockage gaz, décharge, dépôts de braie, etc..), probablement de moindre importance, qui n'ont pas été incluses ni investiguées dans cette étude. La réalité mesurée dans les divers piézomètres du site est donc différente du résultat de cette modélisation comme l'atteste la réelle présence de pollution aux Pz17 et Pz14 : pollution ne provenant pas de l'emprise de la cokerie.

Le résultat de la modélisation sur 100 ans présenté sur le Figure 38 met en évidence 2 directions inégales de transport : majoritairement vers le canal et dans une moindre importance vers le nord-est. Toutefois, les inversions saisonnières des conditions hydrodynamiques génèrent une période de 4 mois environ d'alimentation de la nappe par le canal (Figure 31). Ceci inverse progressivement les sens d'écoulements et génère une légère diffusion des polluants au nord et au nord-est de la source de pollution. La bande de terrain de 150 m environ situé entre le canal et l'emprise de la cokerie (zone rétrocédée à des entreprises et donc plus accessibles pour un suivi environnemental) subit en moyenne 8 mois de flux hydraulique chargé en polluant en provenance de la cokerie. Les 4 autres mois, s'établit un flux inverse provenant du canal qui alimente la nappe et susceptible de lessiver le sol des polluants les plus solubles. Le prélèvement et l'analyse d'échantillon d'eau dans cette zone doit donc être corrélée avec la situation hydraulique du moment.

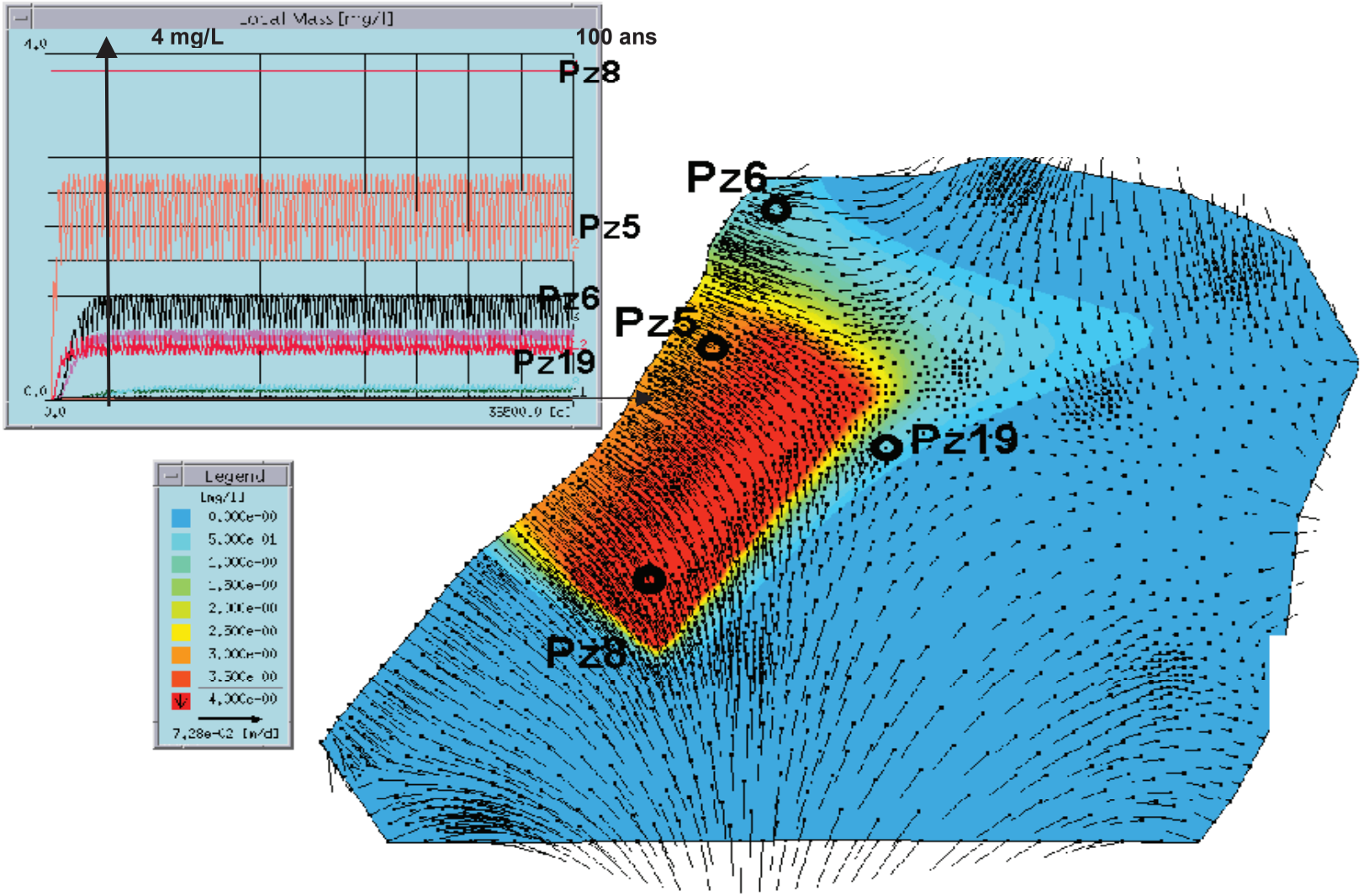


Figure 38 : *Vue en plan de la modélisation du transport du naphtalène sur 100 ans dans la couche de grave (horizon productif de l'aquifère situé entre 6 et 10 m de profondeur et surplombant le substratum imperméable). Les codes couleurs caractérisent les concentrations en mg/l de naphtalène et les courbes de leur évolution dans le temps en différents piézomètres*

L'incertitude de cette modélisation aurait pu être déterminée par quelques prélèvements dans le panache de pollution, c'est à dire entre la cokerie et le canal, chose impossible en raison de la rétrocession des terrain à une entreprise. Ce résultat est plus qualitatif que quantitatif.

Ce résultat certes qualitatif apporte suffisamment d'informations sur le fonctionnement du site et permettra d'apporter des éléments de choix pour l'implantation des futurs piézomètres destinés à l'instrumentation du site (Monitoring).

II.8. Instrumentation du Site

A la suite des investigations préliminaires qui présentent les polluants présents et de la modélisation hydrodispersive, il est maintenant possible de sélectionner les paramètres à suivre et d'étudier l'instrumentation du site.

II.8.1. Indicateurs de pollutions retenus

Compte tenu des études préliminaires les indicateurs les plus représentatifs pour le suivi de ce site sont les suivants :

- pour la phase liquide en zone saturée :
  - les HAP et surtout le naphtalène (HAP le plus soluble) ;
  - paramètres physico-chimiques (pH, oxygène dissous, ammonium, etc..)
  -
- pour la phase gazeuse en zone non saturée, les biogaz (CH_4,CO_2 et O_2) caractérisant l'activité respiratoire du sol (biodégradation).
- pour l'atmosphère ambiante, les paramètres climatiques généraux (température, pluie, humidité).

La nappe profonde située sous le substratum argileux n'est pas touchée par la pollution et donc pas concernée par cette étude. On rappelle que l'aquifère superficiel est de type semi-captif et que la partie productive générant le transport des polluants, est constituée d'une couche de grave de 4 m d'épaisseur située au-dessus du substratum.

II.8.2. Sélection et choix des analyseurs

II.8.2.1. Définition des besoins

Pour le Monitoring Continu de Site Pollué, les analyseurs doivent satisfaire :

- un fonctionnement en continu et de façon autonome (énergie, consommables, transfert automatique des données) ;
- une compatibilité avec un environnement hostile (intempéries, poussières, variations de températures, vibrations, malveillance, etc… suivant la particularité du site) ;
- une fiabilité maximum (peu de dérive, correction automatique en fonction des écarts de températures/humidité, minimum de maintenance).

Il faut donc du matériel "terrain" capable d'une précision acceptable avec une bonne stabilité dans le temps. Par opposition, un matériel de laboratoire sera plus précis mais nécessitera une attention constante pour les réglages fins et autres calibrations.

Chaque analyseur doit être équipé d'une sortie analogique (signal électrique) standard pour être connectée à une centrale d'acquisition qui assurera la récupération automatique des données d'analyses. En règle générale, les protocoles utilisés sont une tension ou une intensité de courant proportionnelle à la valeur d'analyse, soit 0-1 V (ou 4-20 mA) pour les valeurs minimale et maximale de l'échelle de l'analyseur.

II.8.2.2. Techniques et matériels d'analyse adaptés aux besoins

Une synthèse comparative des technologies disponibles a été réalisée. Cette synthèse a fait l'objet d'un rapport détaillé CNRSSP 97/16 *[BRANCHU, 1997]* dans lequel figure également le retour d'expérience d'utilisateurs. Ce rapport présente une liste non exhaustive des analyseurs adaptés au Monitoring de Sites pollués classés par milieu étudié : phase gazeuse en zone non saturée et phase liquide en zone saturée.

Les techniques analytiques utilisées pour chacun des milieux se décomposent en 2 groupes :

- Analyse *in situ* : la mesure est directement réalisée dans le milieu étudié soit un analyseur par point de mesure ;
- Analyse sur site : acheminement de l'échantillon par pompage jusqu'à un analyseur situé dans un local sur le site, soit un analyseur pour tous les points de mesure.

Le nombre de points de mesure pouvant être important pour le suivi d'un site pollué, voire évolutif dans le cas du suivi d'une réhabilitation (optimisation du processus de dépollution par suivi en temps réel de son efficacité), c'est la technique de l'analyse sur site qui a été privilégiée pour le Monitoring (HAP de la phase liquide en zone saturée et COV/biogaz de la phase gazeuse de la zone non saturée) avec toutefois quelques analyses *in situ* pour information (paramètres physico-chimiques de la phase liquide de la zone saturée). Ce choix demande donc l'étude d'un système de prélèvement et d'acheminement des échantillons aux analyseurs avec la prise en compte des contraintes pratiques propres au site comme la distance entre points de prélèvements et analyseurs, les besoins en énergie, la protection contre les intempéries et le vandalisme, etc… De cet état de l'art aboutira la sélection d'un analyseur pour chaque indicateur à suivre. En Annexe 14, sont présentées les références des fabricants (cités ci-après ou non) proposant du matériel d'analyse adaptés au Monitoring Continu de Site Pollué.

II.8.2.2.1. Analyses sur site des hydrocarbures en phase liquide de la zone saturée

II.8.2.2.1.1. Mesures sélectives

Une séparation des différentes substances présentes dans l'échantillon liquide est nécessaire avant détection. La difficulté sur le terrain n'est pas la détection mais la séparation de ces substances car il est difficile de transposer l'outil HPLC-UV (High Pressure Liquid Chromatography) sur site.

Toutefois, des expérimentations sont menées sur les sols pollués qui, il est vrai, présentent des concentrations nettement plus élevées que les eaux.

A ce titre on peut citer :

- la procédure analytique basée sur la spectrophotométrie UV qui permet grâce à une méthode d'exploitation fine des spectres d'obtenir la concentration de quelques HAP isolés *[CRONE, 2000]* ;
- La Spectrophotométrie d'Absorption dans l'UltraViolet (SPA-UV), méthode rapide de terrain, couplée avec une Extraction par Sonde Ultra-Sons (ESUS) et l'utilisation de la Régression MultiLinéaire (RML) permet la quantification des concentrations individuelles de 14 des 16 HAP de la liste de l'US-EPA dans les sols (naphtalène et acénaphtylène exclus) *[STEYER, 2003]* ;

Pour les eaux, il est possible d'envisager l'adaptation ultérieure de ces techniques. Actuellement le Laboratoire des verres et céramiques de l'Université Rennes 1 *[MICHEL et al, 2002]* en collaboration avec les Universités de Vienne (Autriche) et de Munich (Allemagne) (partenariat européen IMSIS : In Situ Monitoring of Landfill Related Contaminants in Soil and Water - http://www.ipm.fhg.de/english/fields/pp_monitoring/process/fluid/imsis.html) développent une technique de détection *in situ* de polluants hydrocarbures dans les eaux brutes par fibres optique infrarouge. Ces dernières sont développées au laboratoire de Rennes à partir de verres de chalogénures (verre obtenu dans le système ternaire tellure, arsenic et sélénium $Te_2As_3Se_5$ -TAS- présentant une large fenêtre de transmission optique couvrant la région spectrale allant de 2 à 16µm) transparent dans l'IR. Ces fibres sont utilisées comme capteurs chimiques pour faire de la spectroscopie infrarouge déportée. Une fibre optique effilée en son milieu constitue en tant que telle le capteur optique. Simplement celle-ci est recouverte d'un polymère pour la rendre plus souple et placée dans des gaines de protection en téflon pour la protéger lorsqu'elle doit être immergée dans des puits. Le rôle de la fibre est double : déporter le signal optique du spectromètre vers la zone polluée d'une part, servir de capteur par immersion de la zone effilée dans le milieu pollué d'autre part. Le faisceau Infra Rouge est transmis tout au long de la fibre par réflexion totale à l'interface verre/air. Tant que le milieu environnant la fibre est non absorbant dans l'infrarouge (comme l'air), la réflexion est totale et toute l'énergie lumineuse introduite dans la fibre est retrouvée en sortie. Par contre lorsque la partie la plus fine de la fibre est mise au contact d'une substance organique, une partie de l'intensité lumineuse s'échappe à l'extérieur de la fibre et les champs électromagnétiques correspondants sont absorbés par la substance. Il s'agit de la Réflexion Totale Atténuée (ATR). On préfère cependant utiliser l'acronyme FEWS (Fiber Evanescent Wave Spectroscopy) lorsque le signal est collecté par une fibre optique.

Les intensités lumineuses absorbées sont caractéristiques des substances mises en contact avec la fibre. L'étude du signal récupéré en sortie de fibre, appelé spectre, permet alors d'identifier et de quantifier les produits analysés mis en contact avec la fibre. Il suffit pour cela que ces substances possèdent des liaisons qui absorbent dans le moyen infrarouge entre 2 et 12 µm, cas de quasiment toutes les molécules organiques. Le dispositif utilisé, Figure 39, comprend une source infrarouge (un spectromètre à transformée de Fourier Bruker V22), une fibre optique effilée (400-100-400 µm) en verre TAS , un détecteur infrarouge MCT (Mercure-Cadmium-Tellure) refroidi par de l'azote liquide qui permet d'obtenir une bonne sensibilité dans le domaine spectral de 2 à 12 µm.

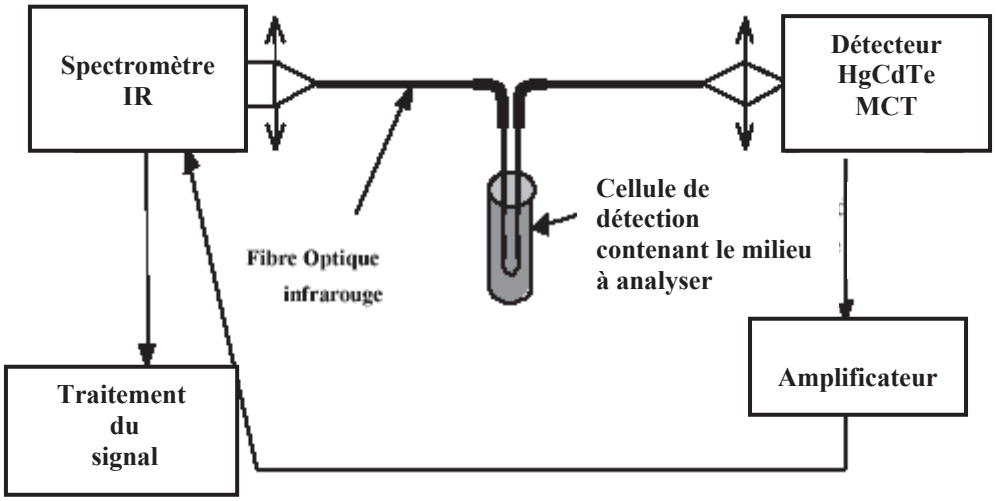


Figure 39 : *Dispositif d'analyse par ondes évanescentes à l'aide d'un capteur fibre optique (d'après Michel, 2002)*

Chaque hydrocarbure ayant une signature optique qui lui est propre avec des bandes d'absorption à un nombre d'onde caractéristique. La technique est donc susceptible de fournir une détection sélective. Si les essais ont été concluants sur le tétracloroéthylène et sur le dichlorobenzène, ce système expérimental nécessite des améliorations. Ceci laisse penser d'éventuelles possibilités pour la détection sélective et en temps réelles des HAP dans les eaux.

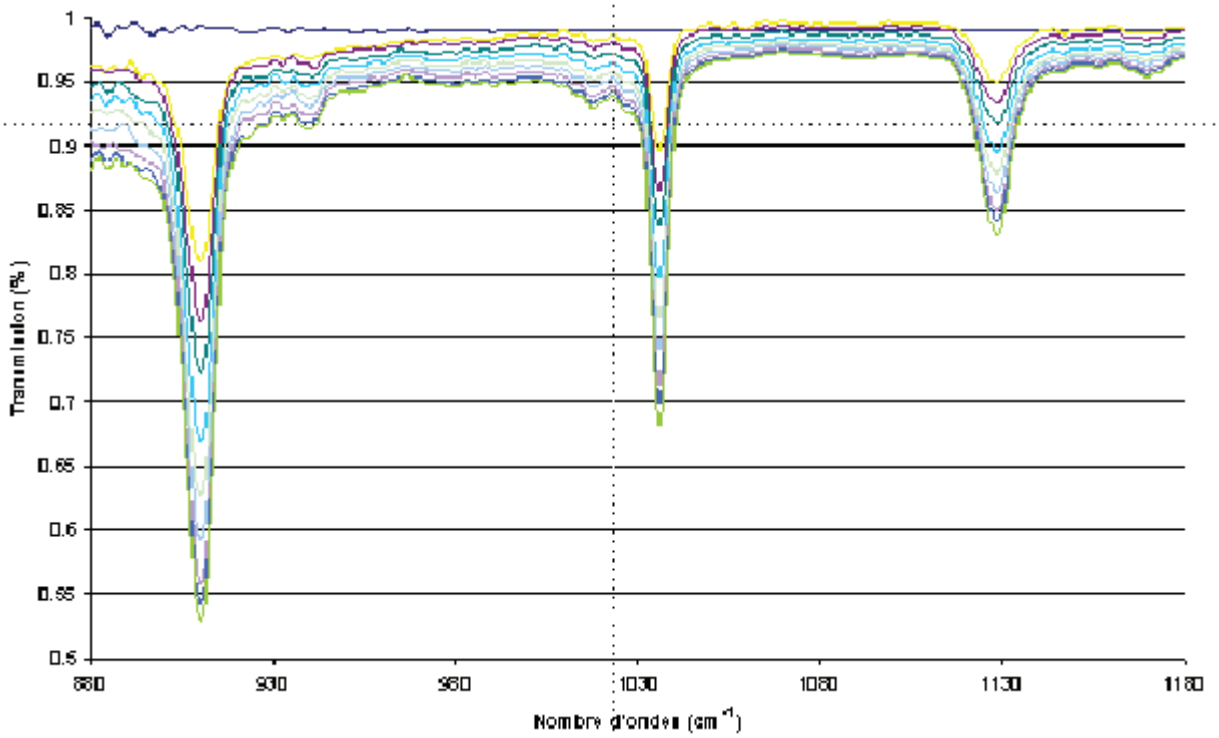


Figure 40 : *Détection du tétrachloroéthylène - 908cm^{-1}- et du dichlorobenzène – 1120cm^{-1}- (d'après Michel, 2002)*

II.8.2.2.1.2. Mesures non sélectives

Dans ce cas, l'analyse est une mesure globale des HAP car mesurant plusieurs substances sans distinction. Plusieurs techniques existent :

Fluorescence UV : cas des fluorimètres commercialisés parTurner Designs et Delta link.

La fluorescence se produit lorsqu'une molécule absorbe une énergie lumineuse d'une certaine longueur d'onde et en émet une autre d'une longueur d'onde supérieure. Les HAP font partie des molécules qui fluorescent. Dans la pratique, il faut un spectre d'émission correspondant à la longueur d'onde d'absorption du composé recherché (le naphtalène dans notre cas). Suivant la largeur du spectre, plusieurs composés vont fluorescer sans que l'on soit en mesure de préciser leur nature et leurs teneurs respectives. Une analyse par fluorescence est donc une mesure globale qui donnera une indication sur la teneur d'HAP plus quelques composés qui fluorescent dans la même gamme de longueur d'onde. Le schéma de principe d'un fluorimètre est présenté sur la Figure 41 (exemple du modèle Turner Designs 10 Au 005).

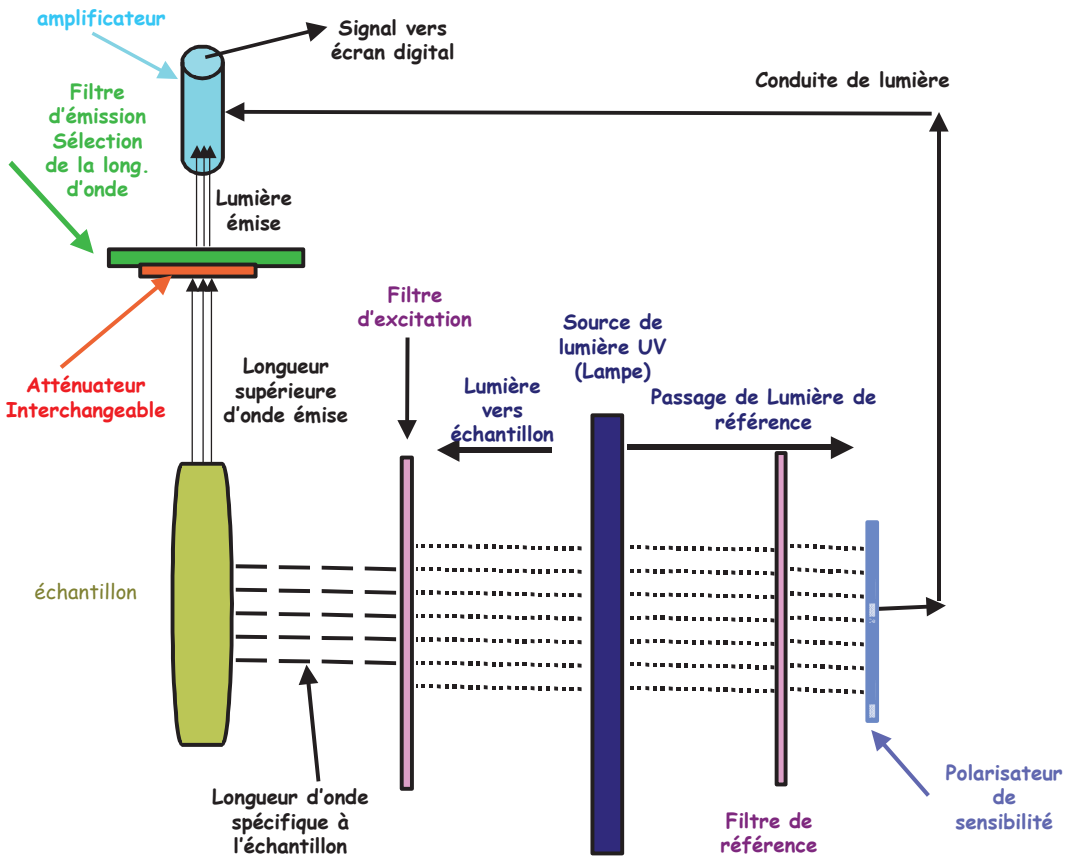


Figure 41 : *Principe de fonctionnement du fluorimètre UV modèle Turner Designs 10 Au 005*

Ce type d'appareil est constitué d'une source de lumière (lampe), d'un filtre d'excitation, d'un tube contenant l'échantillon, et d'un filtre d'émission. Exposé à la lumière, le filtre d'excitation ne laisse passer que la longueur d'onde correspondant à la fluorescence des HAP. Le filtre d'émission sert à éviter la diffusion de la lumière. Exposé à ce rayonnement, l'échantillon adsorbe puis ré-émet une intensité lumineuse

proportionnelle à la concentration du produit et à l'intensité lumineuse d'excitation. Un fluorimètre se calibre avec un étalon référent, la naphtalène dans notre cas. La réponse du fluorimètre lors de la présentation de l'étalon est alors ajustée pour correspondre à la concentration réelle du composé mesurée par HPLC-UV. Toutes les mesures effectuées ultérieurement avec l'analyseur ne seront donc qu'une fluorescence UV équivalente au naphtalène. La maintenance consiste à nettoyer la cellule, à réaliser des calibrations régulières et à remplacer périodiquement la lampe sujette au vieillissement (toutes les 8 000 heures).

Extraction puis spectrométrie infra-rouge : cas des analyseurs commercialisés par Hydro-Environnement, Horiba, Seres, Ionics, etc….

Ce principe spectroscopique repose sur l'absorption de rayonnements infrarouges non dispersifs. Selon la longueur d'onde, la différence d'atténuation du rayonnement IR est représentative de la concentration de l'échantillon concerné. Avant l'analyse, une extraction par solvant (dichlorométhane) des hydrocarbures contenus dans l'échantillon liquide est obligatoire. La détection infrarouge utilise plusieurs longueurs d'onde qui correspondent à celles d'absorption des composés ayant des radicaux CH, CH_2 et CH_3. Ce système permet donc l'analyse des chaînes aliphatiques et aromatiques. Cette technique nécessite une arrivée d'air comprimé déshuilé et sec, une connexion à l'eau du réseau, un apport en solvant (éventuellement recyclé) et de l'eau déminéralisée.

La maintenance consiste, outre l'entretien des appareils, à remplacer régulièrement les consommables (eau permutée, solvant, etc…) nécessaires à l'extraction.

II.8.2.2.2. Analyses *in situ* des paramètres physico-chimiques en phase liquide de la zone saturée

Sont concernés par ce type d'analyses, les mesures physiques (température, pH, potentiel rédox) et chimiques (concentration en NH_4^+, oxygène dissous, etc…) de la phase aqueuse faites à partir de sondes immergées dans un piézomètre (Figure 42).

Ce système offre la possibilité de détecter indirectement l'arrivée d'une pollution (évolution sensible d'O_2 dissous, de NH_4^+) plutôt qu'un suivi réel de son évolution. En effet, une diminution d'O_2 peut signifier une activité de biodégradation, donc la présence d'une pollution organique. De même, la présence de NH_4^+ peut indiquer la présence d'HAP car représentatif d'une pollution au goudron. De ce fait, les sondes seront installées en divers points fortement exposés à la contamination mais non encore pollués. Les sondes ne sont pas connectées au dispositif général, autonomes en énergie et disposent d'une mémoire interne pour le stockage des données d'analyses. La maintenance régulière consiste au nettoyage de la cellule, à la récupération des données et à la calibration de l'appareil.

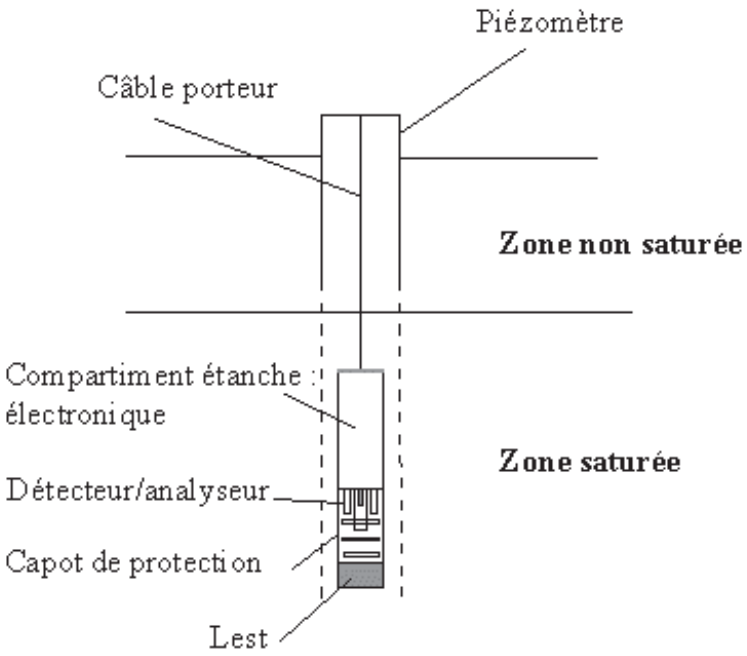


Figure 42 : *Schéma général d'une sonde pour des mesures in situ dans la nappe (d'après Branchu, 1997)*

Il existe de nombreux fabricants commercialisant ce type de matériel selon les différentes catégories décrites ci-dessous :

II.8.2.2.2.1. Electrodes sélectives

Il existe des sondes spécifiques équipées d'une cellule électrochimique de mesure, capables de mesurer la concentration d'ions dissous en phase aqueuse. Elles sont constituées d'une électrode iono-sélective avec une membrane, d'une solution de remplissage interne et d'une électrode de référence interne (demi-cellule galvanique) ou externe (électrolyte de référence). Un potentiel de cellule s'établit à travers la membrane lorsque l'électrode iono-sélective et l'électrode de référence externe sont toutes deux en contact avec la solution aqueuse. Cette mesure se fait avec un courant nul, c'est à dire dans des conditions d'équilibre : le transfert des ions de la membrane vers la solution est égal à celui de la solution vers la membrane.

La membrane est typique des différentes électrodes, elle peut être solide (membrane en verre, membranes solides organiques ou non), liquide (par ex. les échangeurs d'ions, phase vectrice chargée ou neutre) ou encore d'un type spécial (électrode sensible au gaz ou électro-enzymatique). Elle contient normalement un composé sélectif à l'ion qui est responsable du processus de reconnaissance.

Les électrodes sélectives constituent un outil simple, peu coûteux et peu consommateur de temps. Les ions analysables par cette méthode sont nombreux : Ag^+, Ba^{++}, K^+, Ca^{++}, Cu^{++}, Cd^{++}, Hg^{++}, NH_4^+, Pb^{++}, NO_2^-, CO_3^{--}, F^-, Cl^-, Br^-, I^-, ClO_4^-, CN^-, S^{--}, NO_3^-, SCN^-. Les différences existantes entre les différentes marques et fabricants concernent le corps de l'électrode, l'électrolyte de remplissage, l'électrode de référence, le type de membrane...

Ce matériel couramment utilisé au laboratoire, l'est rarement sur le terrain car il existe de nombreuses difficultés directement liées au milieu à analyser. En effet, l'électrode mesure l'activité de l'ion et pour connaître sa concentration et sa spéciation, il est nécessaire de déterminer le pH et la force ionique de la solution via la mesure de la conductivité. De même, une correction liée à la température peut être nécessaire.

Pour obtenir une mesure de terrain stricte et précise sans dérivation, il est nécessaire de réaliser une analyse chimique complète. Les sondes multi-paramètres, avec leurs possibilités de réaliser plusieurs analyses physiques, sont à même de mesurer, au plus juste, les concentrations d'ions et le NH_4^+ en particulier.

II.8.2.2.2.2. Les sondes multi-paramètres physico-chimiques

Les sondes multi-paramètres sont équipées de capteurs et électrodes permettant la mesure autonome des paramètres physiques et la déduction des concentrations chimiques en ions libres. Il est ainsi possible de mesurer et stoker les données correspondant à la température, la conductivité, le pH, le potentiel redox, la concentration en oxygène dissous, la concentration en ions calcium, potassium, chlorure, nitrate et ammonium. Un capteur pour la turbidité peut y être incorporé.

Parmi les constructeurs de ce type de matériel on peut citer : Hydrolab, Mobrey, Iris, Solomat Néotronics, Grant/Ysi, Idronaut, Amel…

Figure 43 : *Sonde multiparamètres Datasonde 4 (www.hydrolab.com)*

II.8.2.2.3. Analyses sur site des BTEX en phase gazeuse de la zone non saturée

II.8.2.2.3.1. Mesures sélectives

De même que pour la phase liquide, la difficulté réside dans la séparation des substances avant détection. Ici aussi, la transposition de l'outil chromatographie (colonnes, gaz vecteur, gaz combustibles) du laboratoire vers le terrain n'est pas aisée. Cette technologie capable d'une bonne précision pour les BTEX est relativement complexe donc chère et encombrante. Elle n'a pas été retenue pour le Monitoring, toutefois on peut citer :

La chromatographie gazeuse de terrain

La chromatographie gazeuse de terrain permet de réaliser une séparation des substances volatiles les unes des autres et de les analyser. L'élément principal est une colonne dont la paroi est constituée d'un matériau inerte. Les parois sont recouvertes d'une phase solide ou liquide non volatile (*i.e.* gel de silice). Un gaz vecteur traverse la colonne. La colonne se situe dans un four (Figure 44.) Les composés sont séparés dans la colonne grâce à leur rétention plus ou moins importante par le gel de silice et sortent donc avec des temps de séjour différents. Le gaz sortant de la colonne passe dans un détecteur qui peut être de différente nature : ionisation de flamme, potentiel d'ionisation, capture d'électrons, catharomètre, absorbance dans l'U.V., réduction des gaz, ... Ces détecteurs offrent des sensibilités différentes, les plus sensibles étant le détecteur à capture d'électrons et celui à réduction des gaz.

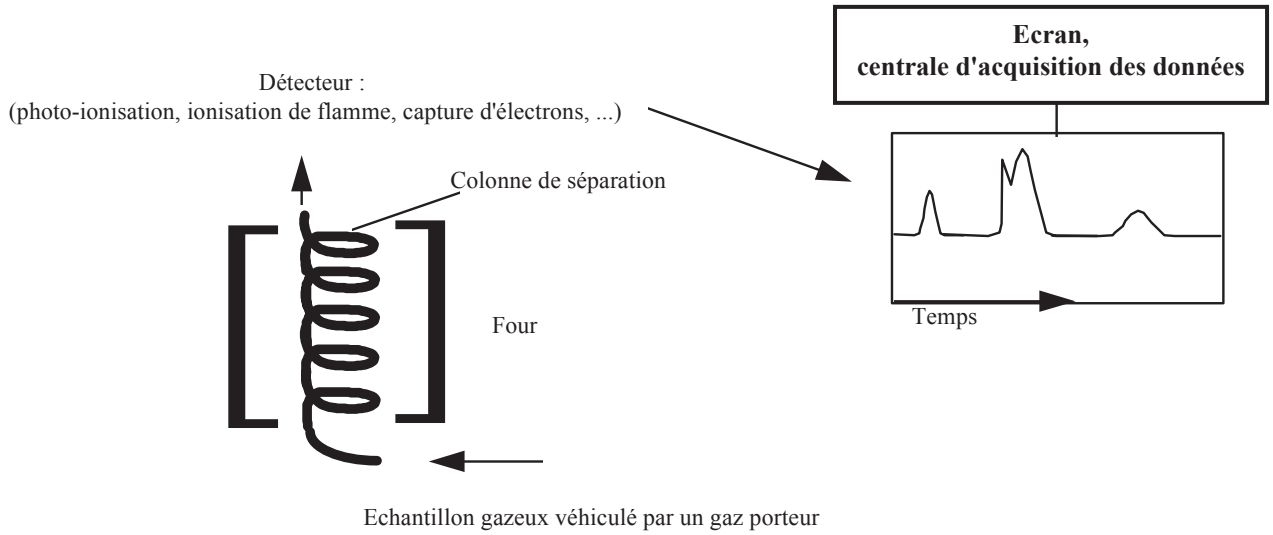


Figure 44 : *Principe de la chromatographie gazeuse (d'après Branchu, 1997)*

II.8.2.2.3.2. Mesures non sélectives

Les analyses non sélectives sont des analyses globales qui caractérisent un spectre de substances que l'on appelle : composés organique volatiles (COV), soit un ensemble de composés appartenant à différentes familles chimiques : hydrocarbures aromatiques, cétones, alcools, alcanes, aldéhydes, etc…).

Deux détecteurs sont couramment utilisés afin d'analyser les COV. Le plus utilisé est le détecteur à potentiel d'ionisation ou photoionisateur (PID) car il est peu coûteux et s'affranchit de l'utilisation de gaz auxiliaires (vecteur et combustible). Le deuxième moyen de détection, également très répandu, est le détecteur à ionisation de flamme (FID). Les principes de ces détecteurs sont présentés ci-dessous et illustrés sur la Figure 45, respectivement [a] et [b].

Les photoionisateurs - PID (Figure 45 [a])

Un atome, ou une molécule, peut être ionisé(e) sous l'effet d'un bombardement de photons d'énergie suffisante pour leur arracher un électron. Ce bombardement est créé à l'aide d'une lampe U.V. Les ions ainsi produits sont dirigés vers une électrode sous l'action d'un potentiel électrique. Le courant mesuré est alors proportionnel à la concentration des espèces ionisées. Théoriquement, seules les espèces présentant un potentiel d'ionisation (PI) inférieur à l'énergie des photons émis pourront être détectées. Dans la pratique, les espèces ayant un PI légèrement supérieur (max. 0,4 eV) à l'énergie des photons pourront également être détectées. Plus l'énergie est forte, plus le nombre d'espèces excitables sera important.

Ces détecteurs doivent être équipés d'un filtre à poussière, car ces particules peuvent absorber le rayonnement U.V. L'intérêt de ces analyseurs est qu'ils nécessitent peu de maintenance : changement de filtre à poussière et nettoyage de la lampe tous les 2 mois. La durée de vie moyenne d'une lampe d'ionisation U.V. est d'environ 1,5 à 2 ans pour une utilisation ponctuelle mais régulière et 3 mois pour un fonctionnement en continu.

Les ionisateurs de flamme - FID (Figure 45 [b])

Les molécules organiques introduites dans une flamme d'hydrogène/air sont ionisées de façon complexe et génèrent un grand nombre d'ions. Une haute tension polarisée est produite entre deux électrodes autour de la flamme et crée un champ électrostatique. Les cations migrent vers l'électrode collectrice et les anions vers l'électrode de haute tension. Un électromètre permet de mesurer le courant issu de l'ionisation des atomes de carbone présents dans la flamme. Le courant généré entre les deux électrodes est proportionnel à la concentration et au contenu en carbone des substances organiques présentes. La précision du débit de l'échantillon à l'entrée de la chambre d'ionisation est un des paramètres importants à maîtriser pour réaliser une mesure de qualité. Cette technique est plus lourde que la précédente car elle nécessite l'utilisation de combustible gazeux.

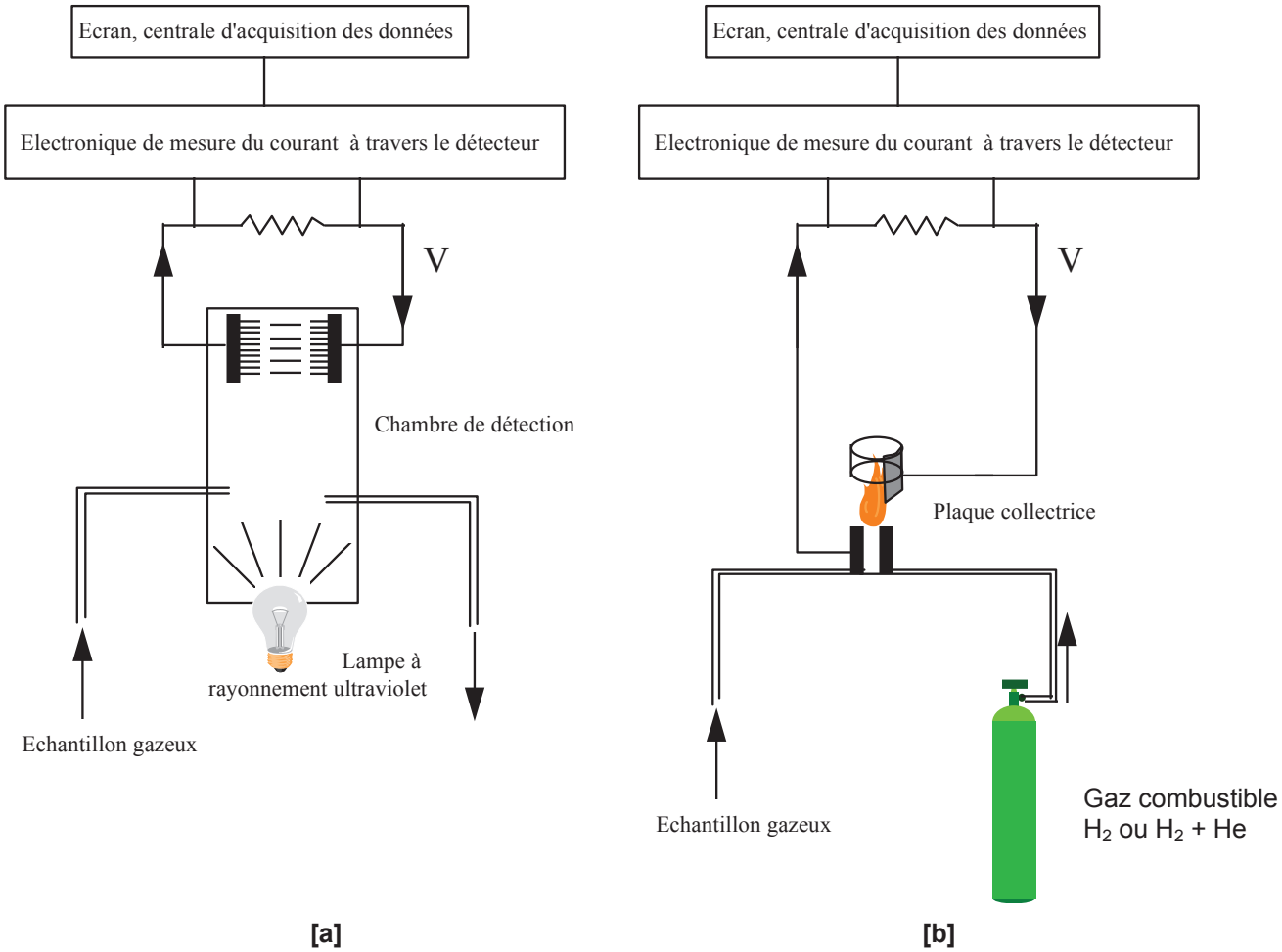


Figure 45 : *Principe de fonctionnement d'un PID [a] et d'un FID [b] (d'après Branchu 1997)*

Le spectre des substances pouvant être analysés par PID et FID est assez voisin. On y retrouve notamment les hydrocarbures aromatiques ou non, halogénés ou non. Le FID permet d'intégrer la mesure du méthane ce que l'énergie de la lampe U.V. du PID ne permet généralement pas. Les limites de détection associées varient en fonction des composés mais sont de l'ordre de 0,1 ppm pour le PID et de l'ordre de 1 ppm pour le FID. La gamme dynamique de mesure est plus étendue dans le cas de la FID : 5 ordres de grandeur, contre 4 pour le PID.

La maintenance est simple : calibration et remplacement périodique de la lampe (PID) ou approvisionnement en gaz pour le FID. Toutefois, le volume et le stockage de bouteilles d'hydrogène peut poser un problème ainsi que le coût du remplacement d'une lampe de PID (tous les 3 mois dans le cas d'une utilisation en continu).

Les analyseurs portables et transportables utilisant ces principes (PID/FID) sont relativement nombreux, on peut citer les constructeurs suivants: HNU, Photovac, Foxboro, Grimm, Draeger, RAE, JUM, Signal, Hartmann et Braun, Horiba, Seres, Groupe Environnement SA, …

II.8.2.2.4. Analyses sur site du biogaz de la zone non saturée

Les analyseurs permettant le suivi des gaz marqueurs de la bio-dégradation combinent la mesure du CH_4 et du CO_2 avec la mesure de l'O_2. Deux types d'analyses coexistent au sein des analyseurs.

Analyse du CH_4 et du CO_2

La concentration en CH_4 et CO_2 du gaz se fait par mesure infrarouge (IR). Ce principe spectroscopique repose sur l'absorption de rayonnements infrarouges non dispersifs. Selon la longueur d'onde, la différence d'atténuation du rayonnement IR est représentative de la concentration de gaz concerné. Les analyseurs mesurent également la pression atmosphérique pour effectuer une correction en fonction des variations de pression.

Analyse de l'O_2 (deux technologies)

Mesure de l'oxygène par cellule électrochimique : les molécules d'oxygène diffusent à travers une membrane (téflon) vers une cellule équipée d'une électrode (cathode en or). Leur réduction génère un courant entre l'électrode en or et une deuxième électrode (anode en plomb). Celui-ci est proportionnel à la quantité d'oxygène présent.

Mesure de l'oxygène par cellule paramagnétique : elle est basée sur la susceptibilité magnétique de ce gaz qui est 100 fois supérieure à celle d'autres gaz courants (azote, hydrogène). Cette susceptibilité variant avec la température, l'analyseur est équipé d'une régulation thermique. Lorsqu'un flux de gaz contenant de l'oxygène traverse la cellule, il crée un champ magnétique additionnel modifiant le champ initial. La mesure de cette modification amène à la connaissance de concentration du gaz.

Les analyseurs sur le marché sont nombreux, on peut citer les fabricants ELE, ADC, Columbus, Siemens…

II.8.2.2.5. Analyses sur site des paramètres climatiques

Mesure de la pluie

Deux paramètres caractérisent les pluies : la hauteur d'eau totale précipitée en mm (1 mm = 1 L/m² = 10m^3/ha) sur une durée fixée (24h, semaine, mois, année) et l'intensité des pluies en fonction du temps en mm/h. Ces 2 caractéristiques complémentaires demandent deux 2 technologies de mesure différenciées principalement par leurs fréquences de mesure.

Le pluviomètre, dont un exemple est montré sur la Figure 46, mesure uniquement la hauteur d'eau entre 2 relevés (quelques heures, quelques jours) mais en aucun cas la variation de l'intensité des pluies durant ce laps de temps. Le principe consiste au remplissage d'un récipient par la pluie. La surface d'interception étant connue, la mesure périodique du volume stocké permet de connaître la hauteur précipitée.

Le pluviographe offre la possibilité de mesurer la variation de l'intensité des pluies grâce à une mesure de la précipitation sur des intervalles de temps très faibles. Par extension, on obtient également la hauteur précipitée totale sur des périodes beaucoup plus longues à l'image du pluviomètre.

Le pluviographe à augets (Figure 47) comme le pluviographe à pesée (Figure 48) sont constitués d'un récipient interceptant la pluie. Le volume d'eau capté est ensuite compté en continu par petits éléments de volume ou de masse. La fréquence du comptage correspond à l'intensité de la pluie.

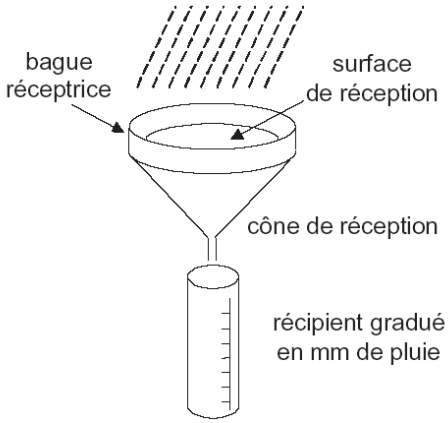


Figure 46 : *Principe du pluviomètre (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)*

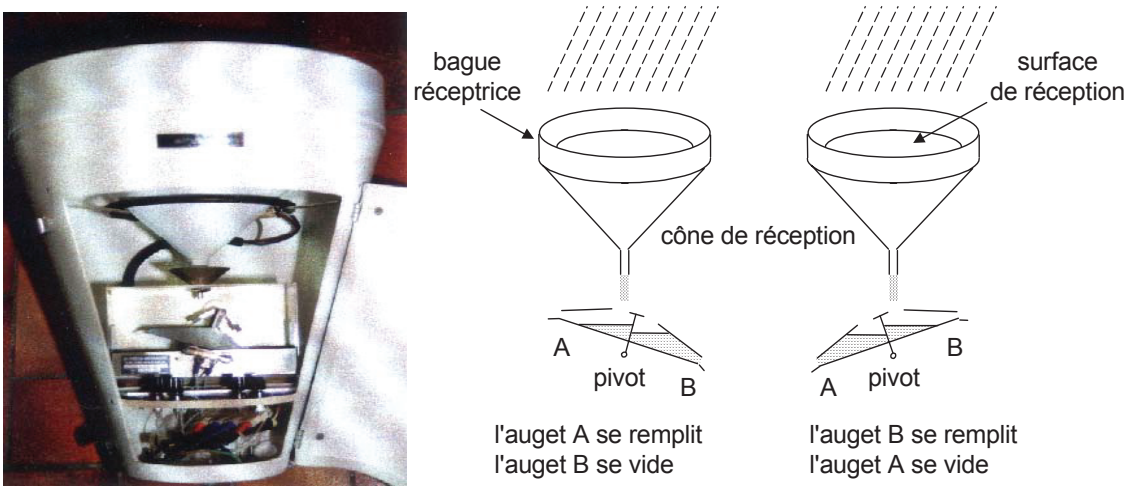


Figure 47 : *Pluviographe à augets - fonctionnement (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)*

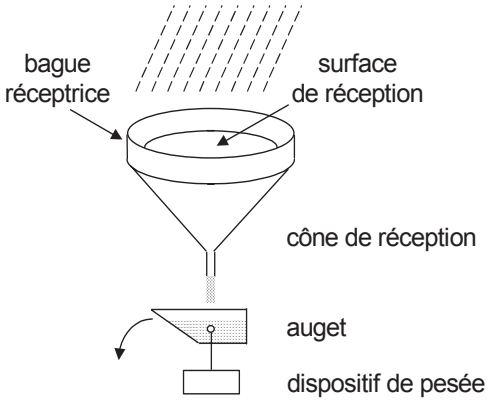


Figure 48 : *Pluviographe à pesée - fonctionnement (d'après Bertrand-Krajewski, 2002)*

Mesure de l'humidité du sol

La mesure de la teneur en eau dans le sol se fait par un prélèvement d'échantillon puis analyse en laboratoire par la méthode gravimétrique (mesure directe) : différence de masse d'un échantillon de sol après passage à l'étuve (105 °C à poids constant). Sur le terrain, la mesure de l'humidité du sol, se fait avec des mesures indirectes soit :

- ✓ des méthodes nucléaires (**humidimètre à neutrons**) ;
- ✓ des méthodes diélectriques (**réflectométrie en domaine temporel, technique capacitive**).

Ces trois techniques correspondent à des sondes spécifiques utilisables sur site essentiellement pour des besoins agricoles et l'irrigation.

La sonde à neutrons (humidimètre à neutrons) : la propagation dans le sol des neutrons rapides émis par une source radioactive (radium-bérylium) sont ralentis par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau. Equipé d'un récepteur, le principe de fonctionnement de la sonde consiste à compter sur un intervalle de temps le nombre de neutrons reçus, proportionnel à l'humidité du sol.

La réflectométrie en domaine temporel (TDR) (Figure 49) **:** c'est un procédé d'envoi de signal et d'observation de l'onde réfléchie. Une onde transportée le long d'une sonde est affectée par le type de matériaux entourant les conducteurs. Si la constante diélectrique de ces matériaux est élevée, le signal se déplace plus lentement. En raison de la constante diélectrique élevée de l'eau, le signal se propage plus lentement dans un milieu humide que dans le même milieu sec. La conductivité ionique affecte l'amplitude du signal mais pas la durée de sa propagation. Donc, la teneur en eau peut être déduite à partir du temps de trajet du signal le long d'une sonde enfouie dans un milieu à mesurer.

Figure 49 : *Sonde TDR : appareil de mesure et exemples de sondes Trime-FM3 (d'après IMKO : http://www.imko.de)*

Cette sonde nécessite une entrée pour l'alimentation électrique et l'activation via un signal ponctuel.

La technique capacitive (Figure 50**):** La constante diélectrique de l'eau libre est beaucoup plus élevée que celle des constituants d'un sol. La sonde capacitive est composée de deux électrodes définissant les armatures d'un condensateur, le sol étant ainsi son diélectrique. La mesure de la capacité de ce condensateur à une fréquence donnée, donne la constante diélectrique du sol qui permet de déduire son humidité.

Figure 50 : *Humidimètre capacitif pour les sols HMS 9000 développé par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Avignon (selon : www.sdec-france.com/fr/HMS9000.html)*

Mesure de l'humidité relative de l'air et de la température de l'air

L'humidité relative de l'air (HR) est la relation entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et la quantité totale de vapeur d'eau pouvant être contenue dans l'air à saturation, pour une température donnée. L'humidité relative indique dans quelle proportion l'air est saturé de vapeur d'eau. Cette valeur est donc dépendante de la température (T) d'où l'association des 2 capteurs en une seule sonde combinée.

$$RH\ (T) = 100\ [P_v / P_s\ (T)\ ]\ \text{avec :}$$

P_v = pression partielle de vapeur d'eau

P_s (T) = pression de vapeur saturante de l'eau à T fonction de la température

La température se mesure généralement par thermocouple, par sonde à résistance électrique ou par thermistance.

Les thermocouples ou couples thermo-électriques transforment une température en une tension électrique mesurable. Le couple est constitué par deux conducteurs A et B (ex : Figure 51) de natures différentes, soudés bout à bout en circuit fermé. Les deux soudures sont à des températures différentes et un courant circule dans le circuit A – B. Les écarts de potentiel et de température entre les 2 soudures sont liés par une relation qui est caractéristique du couple des métaux utilisés. Le fait de chauffer la soudure chaude génère un mini-courant ou force électromotrice (fém) exprimée en millivolts (mV). L'élévation de température est rigoureusement proportionnelle à la force électromotrice enregistrée par le galvanomètre. Cette mesure en mV est ensuite traduite le plus souvent en degrés centigrades avec des tables de correspondances (Figure 52), l'information recherchée.

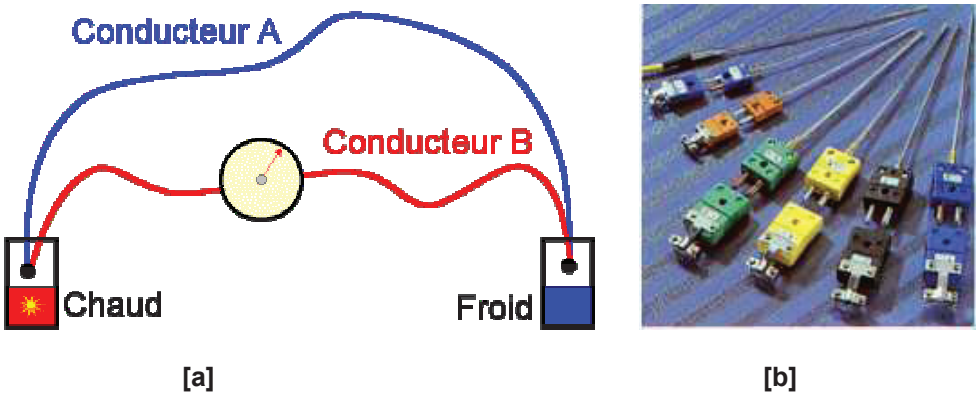


Figure 51 : *Principe thermocouple (d'après Angowski et Gatt, 2002) [a]. Exemples de thermocouples [b]*

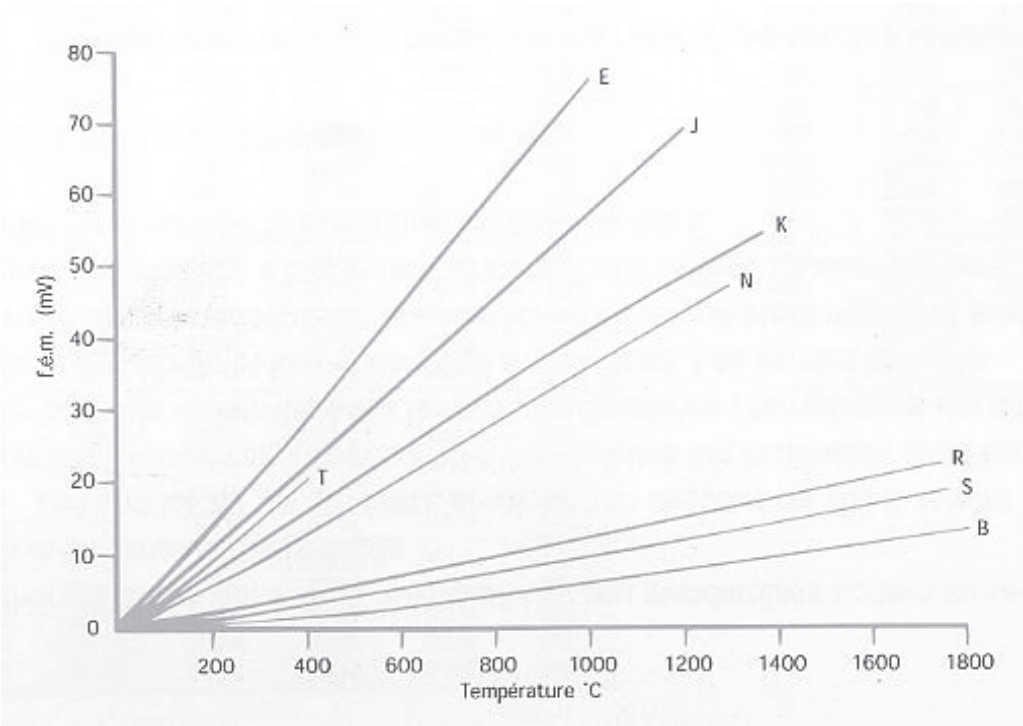


Figure 52 : *Exemples de correspondances entre température et tension (f.é.m) pour différents types de thermocouples (source : TC S.A., www.tcsa.fr)*

Les **thermistances** et **les sondes platines** utilisent le phénomène physique de variation de la résistance électrique d'un conducteur avec la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour repérer les températures par des mesures de résistance. Mais ces lois sont différentes suivant qu'il s'agit :

- d'un métal comme le platine (sonde platine présentée sur la Figure 53) : la résistance électrique d'un conducteur métallique croit avec la température. Cette variation est parfaitement réversible. On peut donc établir une relation résistance (R)/température (T) et déduire T en mesurant R.
- ou d'un agglomérat d'oxydes métalliques frittés (thermistance) : agglomérat rendu compact par haute pression, de l'ordre de 150 bars, exercée à température de 1000 °C. La composition d'une thermistance peut-être en Fe_2O_3 (oxyde ferrique), $MgAl_2O_4$ (aluminate de magnésium) ou Zn_2TiO_4 (oxyde de titane et de zinc). La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Mesurant la résistance on déduit la température.

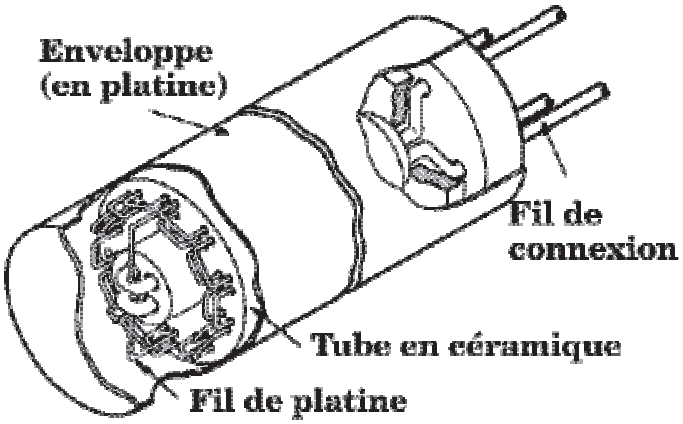


Figure 53 : *Sonde Pt100 - sonde platine présentant une résistance de 100 Ohms pour une température de 0°C, (138,5 pour 100 °C) (d'après Gatt, 2002)*

La relation décrivant la résistance d'une sonde platine en fonction de la température T (supérieure à 0°C) peut s'écrire (d'après www.tcsa.fr) :

$$R_T / R_0 = 1 + A\,T + B\,T^2$$

avec, dans le cas des thermomètres industriels :

$A = 3{,}9083 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$, $B = -5{,}775 \cdot 10^{-7}\ °C^{-2}$, R_0 : résistance à 0°C , R_T : résistance à T.

II.8.2.3. Options et analyseurs retenus pour l'instrumentation

Les investigations préliminaires ont abouti à la sélection d'indicateurs pertinents à suivre pour ce site expérimental ayant subi une pollution historique au goudrons (II.8.1). Il s'agit du naphtalène et de l'ammonium dans l'eau en zone saturée et des biogaz/benzène dans l'air en zone non saturée. L'instrumentation du site expérimental doit permettre leur suivi en continu auquel on ajoutera quelques paramètres généraux comme la température, l'humidité et la pluviométrie. Les analyses sur site ayant été privilégiées au profit des analyses *in situ* (réduction des coût et plus grande flexibilité quant au choix des points de mesures), les analyseurs seront regroupés à l'intérieur d'un local de mesure judicieusement positionné par rapport aux accès et à l'implantation des points de mesure. L'implantation de ces derniers sera choisie en fonction des résultats de la campagne d'échantillonnage des sols et de la modélisation hydrodispersive. Des boucles hydrauliques et pneumatiques formées de conduites enterrées permettront l'acheminement des échantillons d'eau et de gaz. La protection contre le vandalisme a nécessité l'enfouissement de tous les câbles et conduites ainsi que l'acquisition d'un bungalow en béton, banalisé en transformateur EDF. Par ailleurs, deux points non pollués de la nappe mais exposés à des risques de contamination (résultat modélisation) seront suivi. Deux sondes multi-paramètres autonomes (analyses *in situ*) compléteront le dispositif, pour l'analyse de paramètres généraux et, pour l'une d'entre elles, l'analyse de l'ion ammonium, indicateur d'une pollution HAP et donc de contamination.

Les analyseurs retenus avec leurs caractéristiques techniques sont les suivants :

Pour les paramètres généraux (pH, Eh, conductivité, T°C, oxygène dissous) et l'ammonium dans l'eau de la zone saturée :

2 Sondes multi-paramètres dont une équipée pour NH_4^+: modèle DataSonde4 d'Hydrolab,

Paramètres	gamme de mesure/ résolution	précision	temps de réponse	calibrage	correction	stabilité	autres unités	type de capteur
T°C	-5,0 à 50,0 °C	± 0,15 %,	< 1 min	non		3 ans		thermistor
O_2 dissous	0,0-20,0 mg/l	± 0,2 mg/l	< 1 min	air et eau saturés	T °C et conductivité	1 mois	% saturation	électrode sélective
Conductivité spécifique à 25°C	0,0-100,0 mS/cm		< 1 min	solution Kd		6 mois	salinité, conductivité, TDS ou résistivité	cellule à 6 électrodes
pH	0,0-14,0	± 0,2	< 1 min	solution tampon	T°C	1 mois		électrode à faible force ionique
Ammonium	0,0-200,0 mg/l	± 0,2 mg/l		solution tampon		15 jours à 1 mois		électrode spécifique
Rédox	-99 à 999 mv	±20 mV	variable	solution tampon		1 mois		

Mémoire : intégrée, max. 120 000 lectures ou boîtier en surface (*Surveyor 4*) max 375 000 mesures. Compartiment étanche 8 piles où boîtier de surface (*Surveyor 4*) ;
Alimentation : sur secteur 220 V ou batterie 12 V ;

Masse : 3,3 kg (avec le lest) ;
Diamètre : 89 mm (55 miniSonde).

Pour l'ensemble des BTEX dans l'air de la zone non saturée :

PID, modèle TVA 1000B de Foxboro

Type d'analyseur : PID portable ;
Linéarité : 0,5 à 500 ppm isobutylène ;
Gamme de mesure : 0,5 à 2000 ppm isobutylène (methyl-2-propène) ;
Limite de détection : 100 ppb (benzène) ;
Répétabilité : ± 1% (100 ppm isobutylène) ;
Temps de réponse : <3,5 s 90% (0-100 ppm isobutylène) ;
Humidité ambiante : 15 à 100 % HR ;
Température ambiante : 0 à 50°C ;
Calibration : zéro (étalon blanc) + 1 point (étalon) ;
Lampe d'ionisation UV : 10,6 eV (durée de vie environ 2000 h) ;
Sonde : sonde avec filtre ;
Stockage des données : oui avec fréquence de mémorisation entre 1 s et 16h30 ;
Autonomie : 8 h min. (20°C) sur batterie rechargeable + 220 V / 12 V ;
Séquenceur : non, pompe : 1L/min ;
Sortie RS232 : oui, logiciel de communication avec l'analyseur ;
Sortie analogiques : oui, 2 sorties analogiques 0-2 V ;
Masse : sonde, < 0,8 kg analyseur, 5,4 kg ;
Dimensions : 34,3 x 26,2 x 8,1 cm.

Pour l'analyse sélective des biogaz (CH_4, CO_2 et O_2) :

Analyseur de biogaz modèle LFG 20 d'ADC

Gamme de mesure (v/v) : CH_4 0-10 % ou 0-100 %, CO_2, 0-10 % ou 0-100 %, O_2, 0-25 % ;
Précision : échelle 0-10% ±0,3 % PE (pleine échelle), 0-50 % ± 3 % et 50-100 % ±5 % (O_2 ± 0,4 % entre 15-35 °C) ;
Temps de réponse : <20 ms 90 % PE ;
Température ambiante : 5-40 °C ;
Détecteurs : CH_4 et CO_2 cellule infrarouge, O_2 cellule électrochimique ;
Stockage des données : non ;
Autonomie : batterie rechargeable ;
Filtre : sonde de prélèvement avec filtre en option ;
Sortie RS232 : non ;
Sorties analogiques : oui 0-1 V / capteur ;
Alimentation : secteur 220 V ;
Masse : 3kg ;
Dimensions : 23 x 21 x 8 cm ;
Pompe : interne.

Pour l'analyse de la température / Humidité Relative de l'air extérieur :

Sonde combinée T/HR, modèle SKH 2013/1 de SKY Instrument distribué sous Eijkelkamp

Gamme de mesure : température –20 / +70 °C, humidité relative : 0-100 % ;
Précision : température < 0,2 °C, humidité relative < 2 % ;
Temps de réponse : 60 ms 90 % PE (pleine échelle) ;
Détecteurs : température pT100 ou thermistance avec sortie tension linéaire/température, humidité relative sonde capacitive ;
Recalibration : 2 fois par trimestre (kit disponible) ;
Sortie analogique : oui 0-1 V / capteur ;
Alimentation : 14-35 V (DC) ;

Masse : 300 g ;
Dimensions : 1405 x 65 mm.

Pour la pluviométrie :

Pluviographe à augets, modèle ARG 100 de l'Institute of Hydrology, Wallinford, UK

Type d'analyseur : pluviographe à augets ;
Sensibilité : 12ml par basculement d'auget soit 0,2 mm de lame d'eau ;
Sortie : signal binaire (impulsion).

Pour l'analyse globale des HAP dans l'eau de la zone saturée :

Fluorimètre UV, modèle 10-AU-005 de Turner Designs Inc

Type d'analyseur : fluorimètre UV portable ;
Substances détectables : hydrocarbures aromatiques ;
Gamme de mesure : 4 ordres de grandeur ;
Sensibilité : 1 à 10 ppb ;
Principe de mesure : fluorescence UV ;
Influence de température : compensée en option ;
Température ambiante : 0 à 55 °C ;
Etalonnage : 1 point ;
Durée de vie de la lampe UV : 8000 h en continu ;
Mémoire : interne (en option), 64800 points ;
Alimentation : batterie rechargeable ou secteur 220 V ;
Sortie analogique : oui ;
Sortie RS232 : oui ;
Masse : 5,6 kg ;
Dimensions : 55 x 50 x 22 cm.

Tous ces matériels ont été mis en service en laboratoire avant installation sur site pour vérifier leur état de marche et appréhender les contraintes d'installation éventuelles (branchement, exhaure, etc..). Toutefois, les conditions de terrain et les exigences d'un fonctionnement en continu n'ont pu être reproduites en laboratoire en raison de l'absence d'expérience antérieure dans le domaine de l'instrumentation de site. Les véritables contraintes du suivi en continu n'étaient pas encore connues (e.g. impossibilité de mettre les appareils en veille, agression du passage répété de l'eau brute dans les cellules, etc…). La réalisation d'une plate forme d'essai et sa mise à disposition pour tester des analyseurs en condition de terrain pourrait être un objectif du MCSP.

II.8.3. Implantation des points de mesure et du local d'analyse

Le choix des points de mesure s'est fait en fonction des conclusions de la campagne d'échantillonnage et de la modélisation hydrodispersive. Il a fallu également tenir compte des contraintes du site et notamment des zones rétrocédées aux entreprises voisines (Figure 13). Ceci interdit donc toutes possibilités entre l'emprise de la cokerie et le canal, zone particulièrement intéressante car concernée par le transport de polluant (Figure 38). De plus, le caractère expérimental du projet a conduit à limiter les points de prélèvement, l'objectif n'étant pas de suivre précisément ce site mais plutôt de **prouver la faisabilité du dispositif** avec quelques points en vue d'une possible généralisation à d'autres sites similaires.

Pour le suivi des eaux de la nappe superficielle, 3 piézomètres, Pz9A, Pz18A et Pz19A (Annexe 18 – respectivement situés à 5 m des Pz9, Pz18 et Pz19), ont été sélectionnés en raison de caractéristiques communes :

- situés dans le panache de pollution diffuse mis en évidence par la modélisation ;
- en bordure de la zone la plus contaminée (emprise de l'usine) ;
- avec des concentrations similaires comprises entre 1 et 20 µg/L d'HAP (Figure 54).

Le fait d'avoir des concentrations en HAP du même ordre de grandeur simplifie énormément la technique d'analyse en évitant l'emploi de plusieurs calibres de mesure, voire d'appareils, ou encore de boucles de dilutions. Une pompe immergée dans chaque piézomètre est prévue pour le refoulement des échantillons d'eau au local d'analyse au travers des conduites enterrées (hors gel et vandalisme).

Pour le suivi des gaz de la zone non saturée, 5 cannes de prélèvement (GI, G2, G3, G4 et G5) ont été implantées dans une zone où les investigations montraient une forte pollution, c'est à dire à proximité du piézomètre Pz8 (Figure 54). Les chambres de prélèvement se situent à 1,5 m sous le terrain naturel juste au-dessus de la nappe superficielle. La pompe d'aspiration du local d'analyse assure l'acheminement des échantillons au travers de conduites enterrées de faibles diamètres.

Le local d'analyse, destiné à recevoir les analyseurs et tous les équipements techniques, est implanté en position centrale et à proximité de la zone polluée, soit à 250 m maximum des différents points de mesure (Figure 54). Une piste carrossable a permis une mise en place facile aux moyens d'engins classiques de manutention (porte-char et grue sur pneus). En contre partie, il se trouve éloigné des zones d'activités (habitations/entreprises) ce qui peut constituer un risque pour la sécurité de l'installation.

Le piézomètre Pz16, actuellement exempt de pollution, sera touché par le futur panache de pollution décrit par la modélisation hydrodispersive. Il sera donc équipé d'une sonde multi-paramètres (T °C, conductivité, pH, Eh, NH_4^+) comme détecteur de pollution, l'ammonium étant caractéristique d'une pollution aux goudrons. Au piézomètre Pz9, une seconde sonde multi-paramètres, sans capteur ammonium, mesurera les paramètres généraux pour information. Les autres paramètres, température, humidité, pluie, … seront mesurés depuis le local d'analyse.

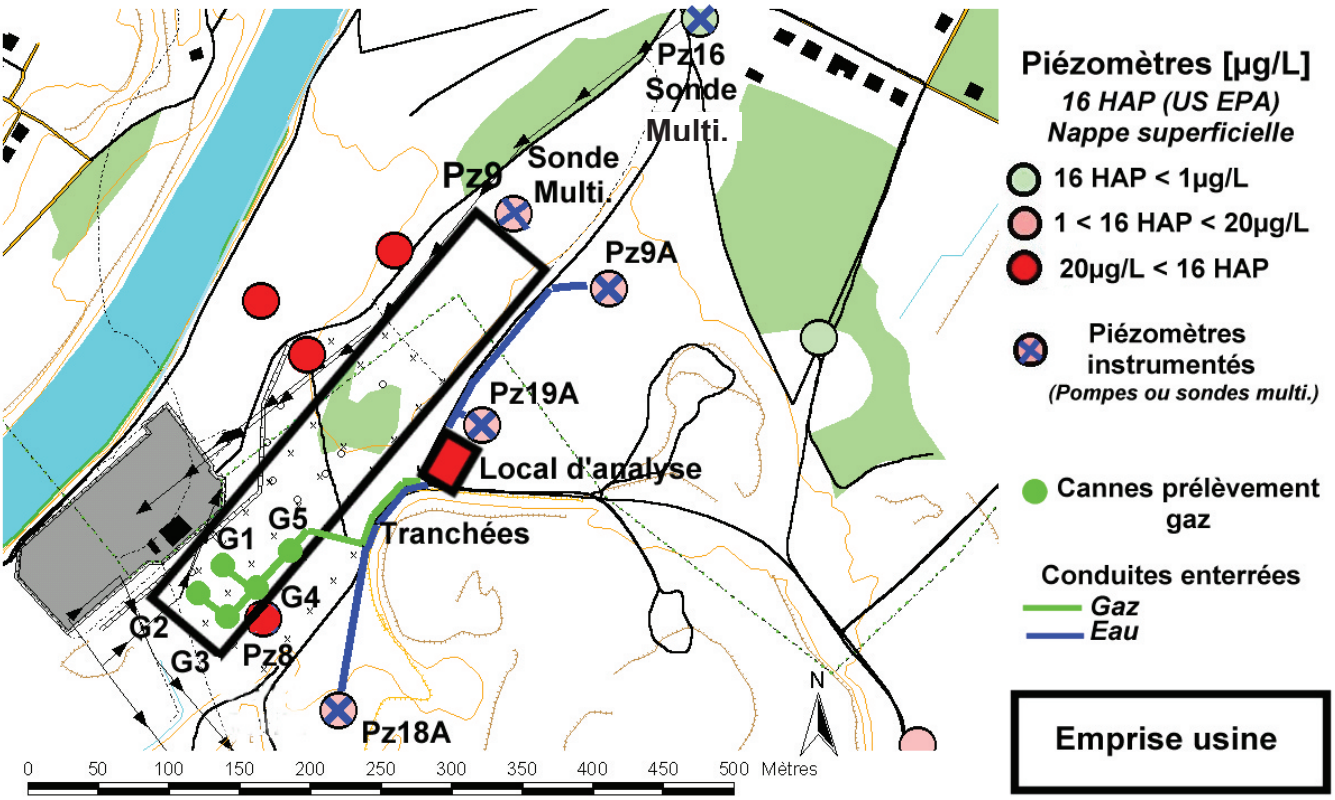


Figure 54 : *Plan de l'instrumentation du site (BD Topo © sous SIG Arcview ©)*

II.8.4. Mise en service des analyseurs dans les conditions de fonctionnement

II.8.4.1. PID - Foxboro TVA 1000B

Il s'est rapidement avéré que le PID (Foxboro TVA 1000B) n'était pas adapté aux contraintes d'utilisation qu'impose le suivi continu. La durée de vie de la lampe est de 2000 heures environ, soit avec un fonctionnement en continu, la nécessité de la remplacer tous les deux à trois mois (coût de cette lampe 2500 € HT). De plus, aucune possibilité de mise en marche/veille pilotée n'est possible ce qui aurait permis d'économiser la lampe en dehors des analyses effectives, soit une durée de vie multipliée par 5 dans notre cas. Cette lampe étant de plus très sensible à l'humidité, il est également nécessaire de changer régulièrement les filtres pour piéger les traces d'eau (coût de ces filtres 30 € HT/unité). Dans ces conditions, le coût d'exploitation annuel dépasse le prix d'un appareil neuf. Cher et non adapté au "Monitoring Continu de Site Pollué" (appareil portable destiné aux mesures ponctuelles de courtes durées), cet analyseur n'a pu être intégré au système, il servira uniquement pour des analyses ponctuelles lors de maintenances.

Il s'agit là d'une erreur dans la sélection de l'analyseur. La technologie FID avec une mesure plus globale aurait été suffisante et nettement moins coûteuse en fonctionnement, par contre cela aurait nécessité le stockage de gaz combustible dans le respect des normes de sécurité.

II.8.4.2. Biogaz - ADC LFG 20

L'analyseur de biogaz (ADC LFG 20) fonctionne parfaitement, une vérification avec un gaz étalon, constitué de CO_2 et CH_4 à 50/50 [v/v], montre qu'une recalibration toutes les deux à trois semaines est suffisante. Extrêmement simple d'utilisation et de mise en service, une alimentation électrique pilotée permettrait la mise en service de l'appareil uniquement lors des phases d'analyse. Toutefois, cette fonctionnalité n'a pas été utilisée car l'analyseur supporte très bien un fonctionnement en continu.

II.8.4.3. Fluorimètre UV - Turner Designs TVA-AU-OO5

De toutes les analyses sur site, la plus délicate est celle des HAP dans les eaux de la nappe en raison de l'absence de matériel parfaitement adapté sur le marché. Faute de mieux, la fluorescence UV avec une excitation dans le domaine de fluorescence des HAP a été retenue comme une réponse acceptable au problème mais à condition de résoudre les difficultés d'analyses exposées ci-après et d'assurer une reproductibilité satisfaisante des analyses dans le temps (débit, durée, température, etc…).

Les analyses avec le fluorimètre (Turner Designs TVA-AU-005) ont débuté avec pour configuration un filtre d'excitation de 254 nm sur lequel était placé un atténuateur 1/25 (intensité lumineuse divisée par 4) et un filtre d'émission de 300 à 400 nm. La calibration initiale se faisait avec un blanc (solution exempte d'HAP pour le réglage du zéro) puis une solution de 6 HAP (naphtalène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène et pyrène) dont la concentration correspondait à 80 % de l'estimation de la plus haute concentration à mesurer (200 µg/L en l'occurrence), afin de garder une marge en prévision d'une augmentation des teneurs en HAP.

II.8.4.3.1. Débit d'analyse

L'analyse par fluorescence est très sensible aux variations de température, donc à l'échauffement de l'échantillon dans la cellule sous l'effet de la lampe d'excitation, problème rencontré avec des débits trop faibles. De même un débit trop important entraîne une instabilité de la mesure. Des essais de pompage ont donc été réalisés sur site avec l'analyseur afin de sélectionner un débit de fonctionnement, soit entre 200 et 300 l/h. Aucun résultat chiffré ne peut être avancé car les débits ont été déterminés par tâtonnement sur 2 piézomètres (Pz9 et Pz19) en faisant fluctuer le régime de la pompe et en relevant sur l'affichage du fluorimètre les plages où la mesure était stable.

II.8.4.3.2. Comparaison entre la fluorescence UV et l'HPLC-UV

Des prélèvements dans les piézomètres Pz9, Pz18 et Pz19 ont été réalisés avant instrumentation afin d'établir un parallèle entre les analyses de terrain par fluorescence UV, dont le schéma de principe se trouve sur la Figure 41, et les analyses de laboratoires par HPLC-UV (technique généralement utilisée pour la détermination des HAP) des eaux brutes du site.

On rappelle que l'analyse en laboratoire des HAP sur les eaux se fait par extraction liquide-liquide au dichlorométhane suivi d'un dosage par HPLC-UV après échange de solvant avec l'acétonitrile. On dose ainsi les 16 HAP de la liste l'US EPA (analyse sélective). En revanche, la mesure réalisée sur site avec le fluorimètre UV est une mesure de fluorescence directe et globale, toutes les molécules contenues dans l'échantillon et possédant des propriétés de fluorescence contribuent au signal. Dans notre cas, la comparaison se fera uniquement sur la somme des 16 HAP de l'US-EPA.

Les résultats obtenus sont reportés dans les tableaux ci-après. Les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent aux écart-types. En Annexe 14 sont reportées en détail les concentrations en HAP mesurées pour chaque piézomètre.

Dans cette étude, le fluorimètre est calibré avec un étalon au naphtalène. La réponse de l'appareil est calée sur la concentration de l'étalon mesurée au préalable par HPLC-UV. Les mesures faites ultérieurement avec ce fluorimètre sur des échantillons d'eau expriment donc une fluorescence UV équivalente naphtalène exprimée en [g/L].

Tableau 11 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour les piézomètres suivis (écart type)*

	Pz18/Pz18A		**Pz19/Pz19A**		**Pz9/Pz9A**	
	HPLC-UV [µg/L]	**FLUO** [µg/L]	**HPLC-UV** [µg/L]	**FLUO** [µg/L]	**HPLC-UV** [µg/L]	**FLUO** [µg/L]
Nov-99	3,47 (±1,55)	130	1,37 (±0,34)	83	14,9 (±5,2)	160
Mars-00	2,53 (±1,22)		1,26 (±0,71)	106	7,03 (±1,29)	133
Avr-00	0,27	105	0,74	75	0,62	80
Mai-00	0,28	54	1,42	74	0,17	74
Juil-00	0,09	27	0,73	29	0,05	36

Une mesure par fluorimétrie n'a pas été possible au mois de mars en raison de la présence en sortie de pompe de sable dans l'échantillon. La présence de ces particules fausserait la mesure avec un risque de détérioration de la cellule en verre.

De plus les eaux brutes analysées ont des teneurs en HAP très faibles (0-20 µg/L) proches des limites de détection des techniques d'analyse du laboratoire. L'incertitude sur les résultats est donc élevée comme en témoignent les écart-types (novembre 1999 et mars 2000 sur Tableau 11) du même ordre de grandeur que la valeur de la mesure. En outre l'extraction liquide-liquide réalisée manuellement avec des ampoules à décanter semble peu reproductible (changement d'opérateur, etc…). Pour améliorer les résultats d'analyse en laboratoire une modification du protocole d'extraction va être mise au point : extraction sur cartouche dite technique SPE (Solid Phase Extraction) qui permet de traiter des quantités d'échantillons moins importantes mais en étant plus efficace et plus reproductible.

Toutefois, on peut constater sur les Figure 55 à Figure 57 que si qualitativement les mesures HPLC-UV et fluorimétrie suivent la même évolution, il est impossible d'en déduire une corrélation fiable. La présence dans les échantillons de nombreuses autres substances, autres que les 16HAP de l'US-EPA, qui fluorescent en sont probablement la cause : comme les HAP alkylés, HAP de plus de 6 noyaux aromatiques ainsi que les éléments issus de la biodégradation.

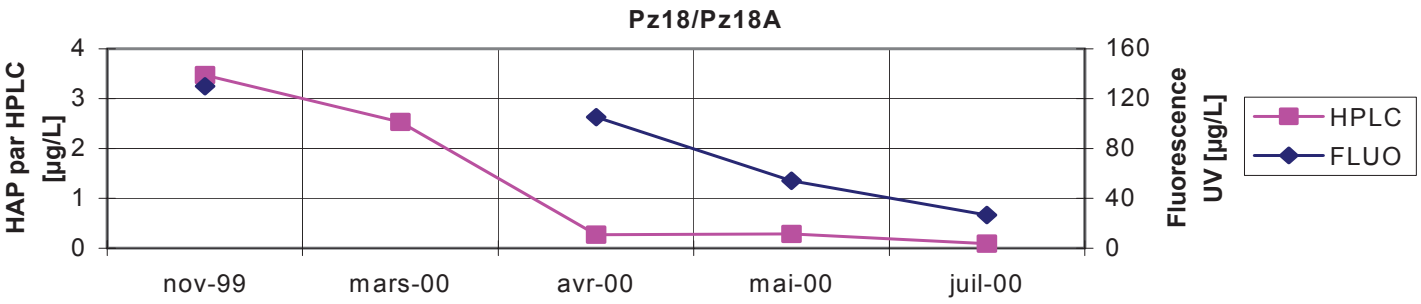


Figure 55 : *Mesures HPLC-UV et Fluorimétrie pour le Pz18/Pz18*

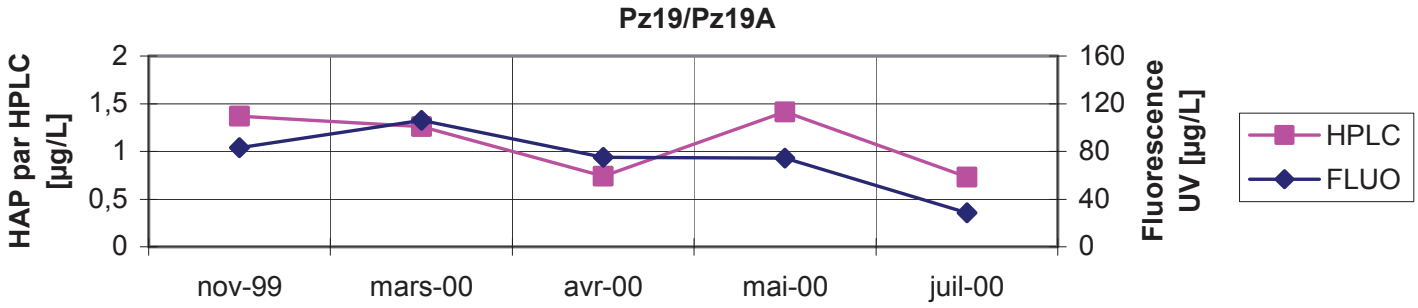


Figure 56 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour le Pz19/Pz19*

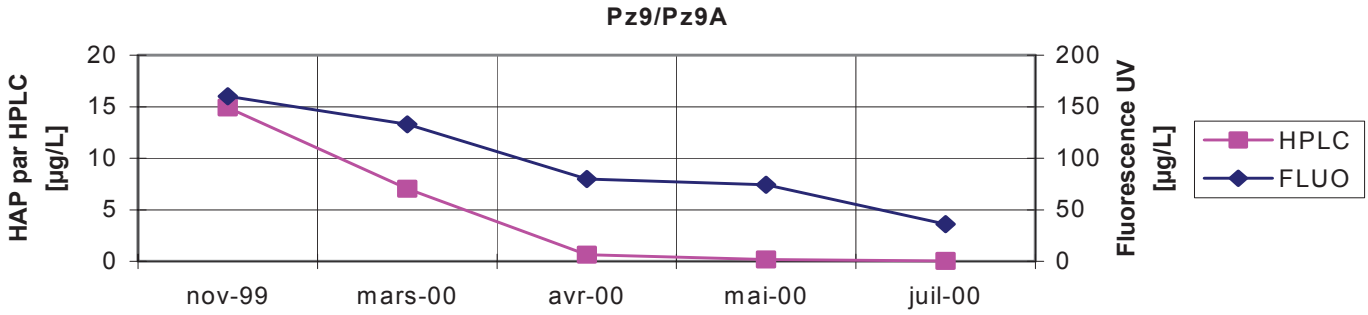


Figure 57 : *Mesures HPLC-UV et fluorimétrie pour le Pz9/Pz9A*

Le vieillissement de la lampe et l'encrassement de la cellule d'analyse sont les deux causes de dérive de l'appareil. Sur 3 semaines d'essai en laboratoire, la dérive électronique (vieillissement de la lampe) semble contenue lorsque la lampe est neuve mais a tendance à augmenter après plusieurs semaines d'utilisation. Sur site, une maintenance régulière toutes les 2 semaines est mise en place pour nettoyer la cellule et recalibrer l'appareil. Pour éviter la stagnation d'eau brute dans la cellule entre les phases d'analyses, un rinçage des circuits à l'eau permutée est effectué après chaque prélèvement de piézomètre. Ceci a l'avantage de permettre un contrôle de l'état de propreté de la cellule, la fluorescence devant être nulle (l'encrassement de la cellule entraîne un signal).

Ces premières constatations sur le fonctionnement du fluorimètre ont fourni un minimum de connaissances pour débuter la phase de suivi. La mesure par fluorescence UV reste une analyse globale qui n'est pas équivalente à une analyse rigoureuse en utilisant l'HPLC-UV. Outre les HAP, d'autres substances fluorescent (e.g. produits issus de la biodégradation, BTEX, etc…), ce qui impose de ne pas interpréter l'analyse de fluorescence comme une concentration en HAP. On parlera donc de fluorescence équivalente au composé ayant servi à la calibration de l'appareil.

La phase d'exploitation permettra d'affiner la procédure d'analyse et de calibration du fluorimètre.

II.8.4.4. Sondes - Hydrolab 4

La mise en service des sondes multi-paramètres s'est faite dans le piézomètre Pz16 pour la température, l'oxygène dissous, la conductivité, le pH, le potentiel rédox et l'ion ammonium. Dans le piézomètre Pz9, la température, l'oxygène dissous, la conductivité, le pH et le potentiel rédox sont suivis.

Les essais conduits en Pz16 et Pz8, montrent une diminution progressive au cours du temps de la concentration en ammonium (Figure 58). Cette baisse provient de l'usure de l'électrode spécifique dont la durée de vie est de 2 à 3 mois. Il convient donc, pour l'ammonium, de calibrer très régulièrement la sonde spécifique (toutes les 1 à 2 semaines environ) et d'assurer son remplacement tous les 2 mois (coût 300 € environ). Mais les relevages et immersions régulières de la sonde dans l'eau pour la maintenance induisent des perturbations sur les mesures d'oxygène dissous et de potentiel rédox. Il faut ensuite attendre une semaine pour observer une stabilisation de la mesure (Figure 60 et Figure 59). La fréquence de recalibration de la sonde ammonium (et des autres capteurs) doit permettre la stabilisation des autres mesures, soit tous les 15 jours.

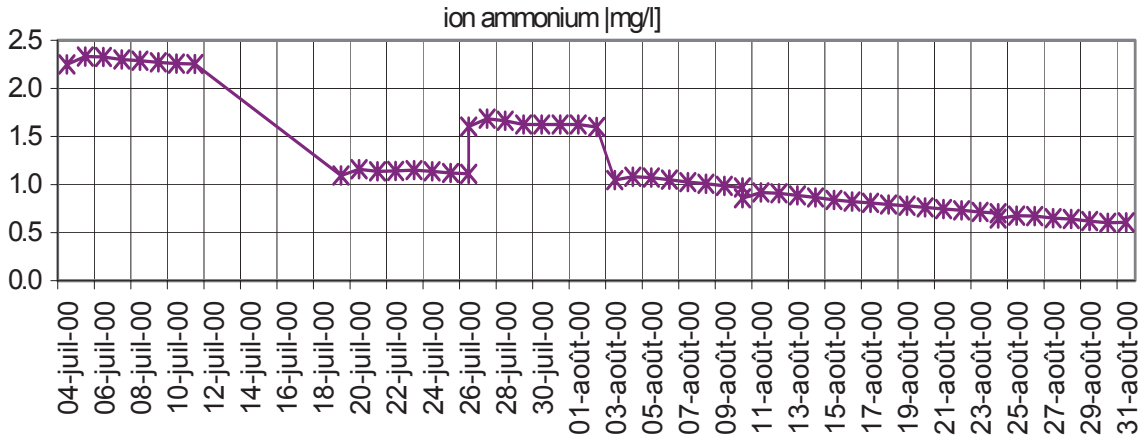


Figure 58 : *Evolution de la concentration en ammonium au cours du temps pour le Pz16*

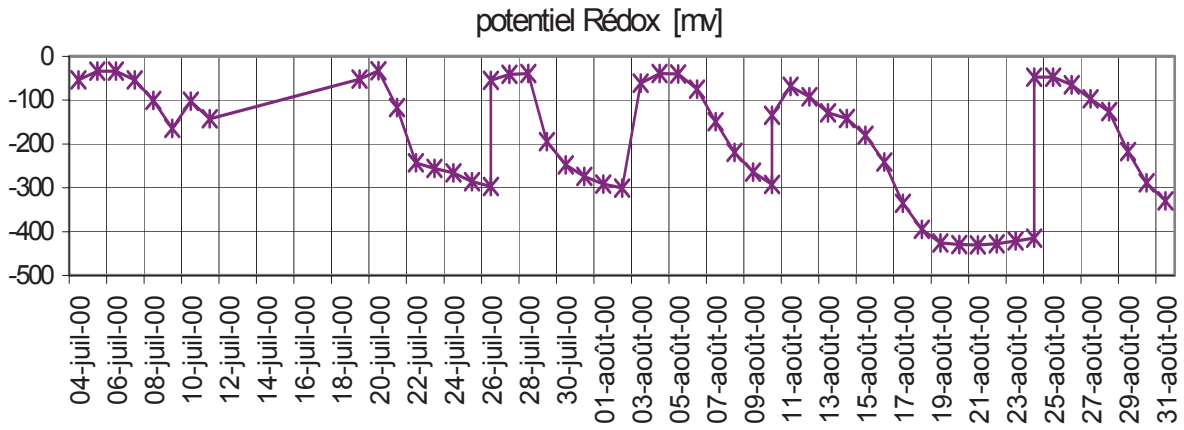


Figure 59 : *Evolution du potentiel Rédox au cours du temps pour le Pz16*
Les pics résultent des relevages/immersions de la sonde

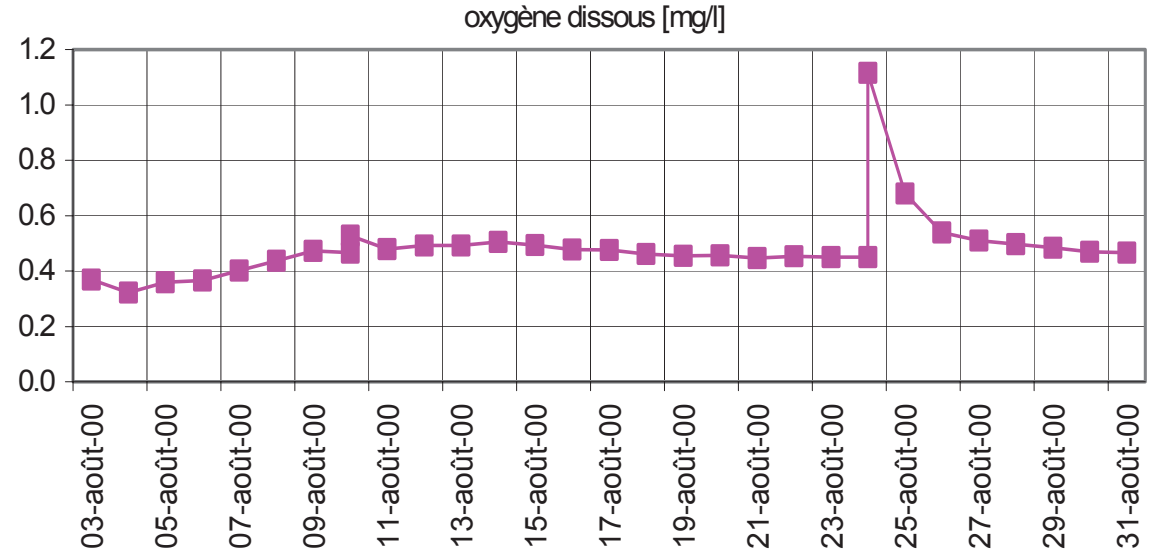


Figure 60 : *Evolution du taux d'oxygène dissous pour le Pz8.*
Le pic résulte du relevage/immersion de la sonde

II.8.5. Système d'acquisition des données

II.8.5.1. Conception générale

Pour le bon fonctionnement des analyseurs en continu, il faut créer l'environnement technique homogène avec un pilotage automatique ou à distance de l'ensemble (dispositif d'acheminement des échantillons, système de pilotage, d'acquisition et de transfert des données).

La Figure 61 présente le schéma de principe des installations hydrauliques et pneumatiques (avec les analyseurs) qui équipent le local d'analyse. Les 3 boucles hydrauliques, correspondant aux 3 points de prélèvements, convergent dans une tubulure unique menant à l'analyseur (Fluorimètre UV) puis à l'exhaure. Même principe pour les 5 boucles pneumatiques, toutes convergent vers une tubulure dans laquelle aspirent les analyseurs (biogaz et PID) via un by-pass. L'analyse par PID transformant le gaz (analyse destructrice par combustion), cet analyseur est équipé de son propre exhaure afin d'éviter une recirculation des rejets. La sélection du point de mesures se fait grâce aux électrovannes pilotées par l'automate. Tous les capteurs, à l'exception des sondes multi-paramètres, sont connectés à une centrale d'acquisition. Cette dernière, permet le stockage de 90 000 mesures. La gestion des automatismes pour le fonctionnement en continu du dispositif (électrovannes) et l'acquisition des données est réalisée par le module alarme qui équipe la centrale d'acquisition. La récupération des données et le pilotage à distance du dispositif se fait par modem.

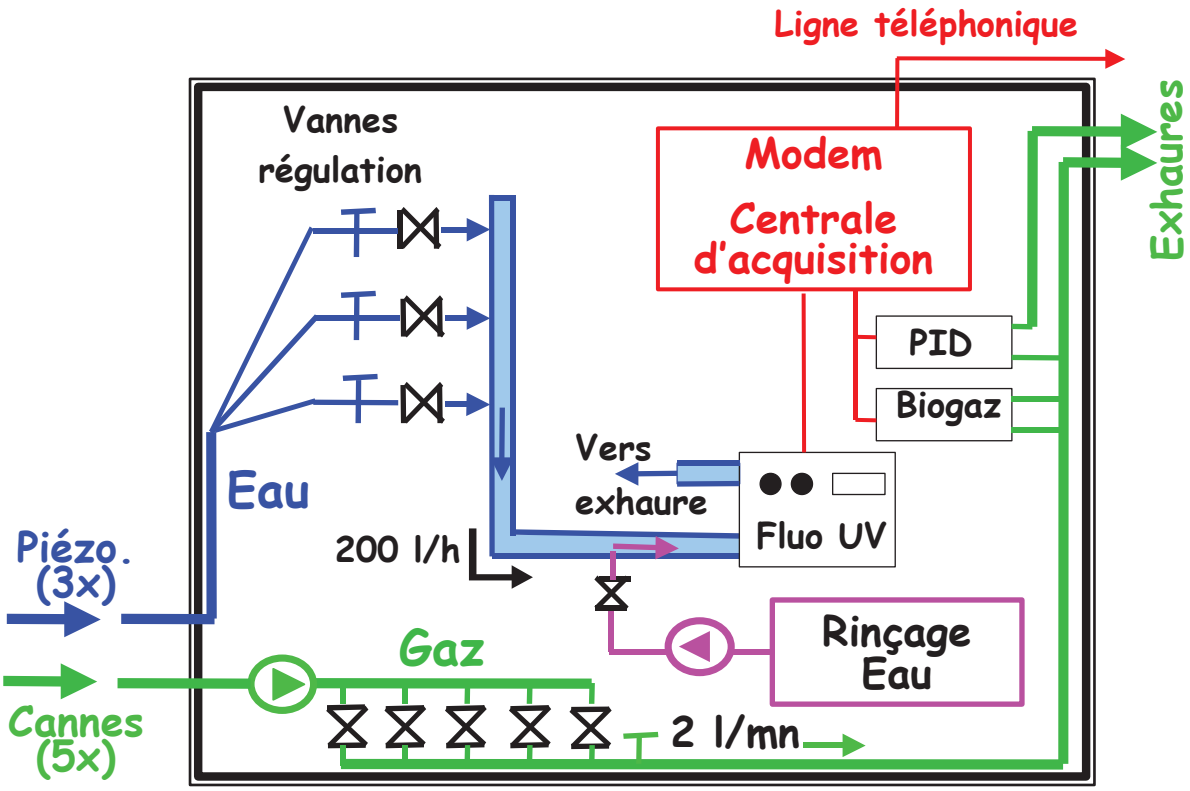


Figure 61 : *Schéma de principe pour l'installation de l'équipement intérieur du local d'analyse.*

II.8.5.2. Local de mesure

Il s'agit d'un local préfabriqué en béton, de type transformateur EdF (*SODEX Erie* -Figure 62*)*, équipé d'une isolation thermique et offrant une bonne protection contre le vandalisme (aucune effraction constatée depuis son installation en décembre 1999) . Il dispose d'un vide sanitaire enterré sous plancher d'un mètre de hauteur équipé de réservations pour le passage des conduites d'eau et de gaz. Outre les analyseurs, la centrale d'acquisition et armoires électriques, le local est équipé d'une alarme reliée à une télésurveillance.

Le local est alimenté par une ligne électrique de 380 V triphasée plus 2 lignes téléphoniques aériennes. La connexion au réseau d'eau potable n'a pas été réalisée car relativement coûteuse et non indispensable.

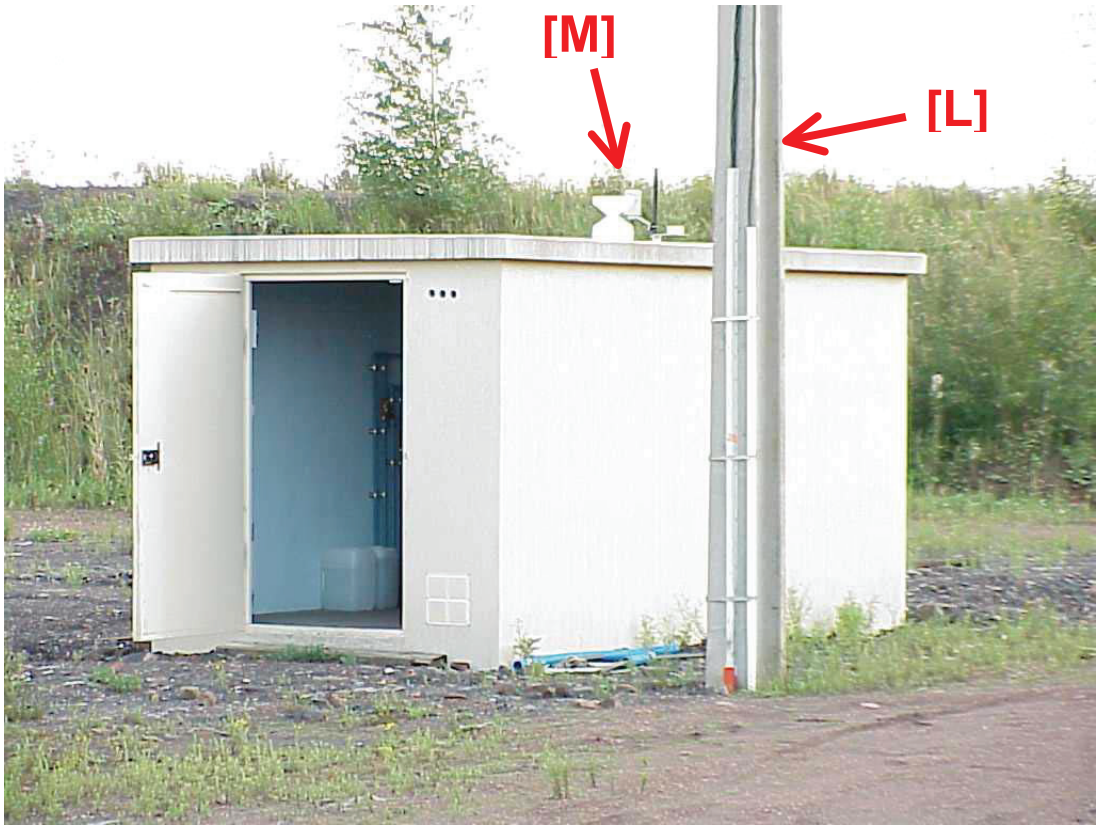
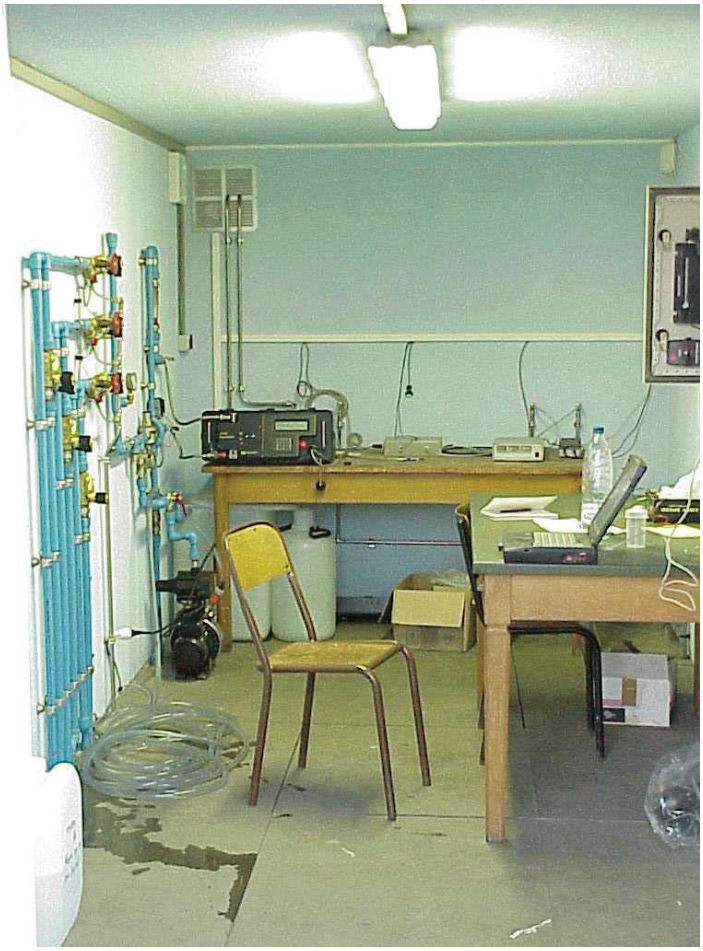
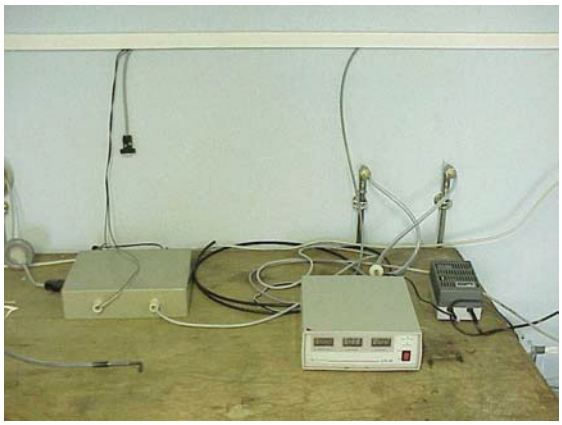


Figure 62 : *Local d'analyse*
[M] : station météo sur le toit
[L] : lignes 380 V et télécom



[a]

[b]



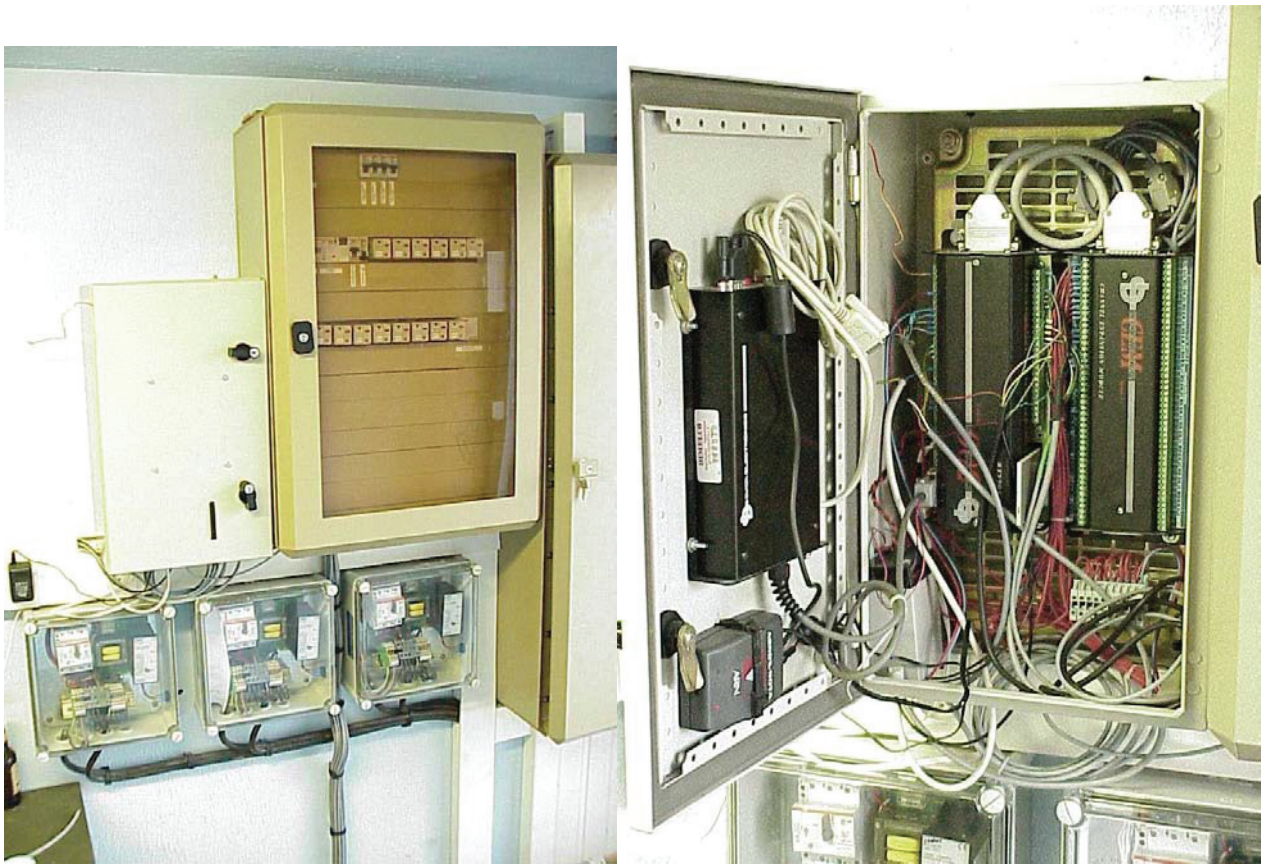
[c]

Figure 63 :
Aménagement intérieur du local d'analyse :
vue d'ensemble [a] ;
arrivée conduite, système de rinçage et fluorimètre [b] ;
analyseur de biogaz [c].

La Figure 63 montre l'intérieur du local de mesure avec les analyseurs à l'exception du PID (non installé). Les armoires électriques visibles sur la Figure 64 renferment :

- ✓ la centrale d'acquisition avec extension et carte mémoire supplémentaire, *Datataker*,
- ✓ Modem avec son boîtier de connexion, *Datataker*.
- ✓ les relais de pilotage/disjoncteurs ;
- ✓ les équipements électriques des 3 pompes.

Dans un soucis de qualité et de sécurité toutes les installations sensibles (électricité de puissance, plomberie) ont été réalisées par des professionnels habilités.



[a] **[b]**

Figure 64 : *Armoires électriques [a] et centrale d'acquisition [b]*

II.8.5.1. Cheminement des échantillons

L'acheminement des échantillons (eau et gaz) se fait par les boucles hydrauliques et pneumatiques. Leurs réalisations ont été confiées à des entreprises locales après consultation suivant un cahier des charges spécifique.

II.8.5.1.1. Boucles hydrauliques

La boucle hydraulique qui équipe chaque piézomètre est équipée d'une pompe immergée, d'un linéaire de conduites de refoulement, d'une vanne de régulation manuelle, d'électrovannes et d'une sortie directe à l'exhaure. Son rôle est d'assurer la régénération de l'eau du piézomètre, puis d'acheminer un échantillon jusqu'au fluorimètre UV avant évacuation dans un puisard.

3 ouvrages sont équipés (voir Figure 54) :

- ✓ Pz18A à 250 m du local de mesure : forage Ø160, tube crépiné 110/125, prof. 12 m;
- ✓ Pz19A à 60 m du local de mesure : forage Ø160, tube crépiné 110/125, prof. 11 m ;
- ✓ Pz9A à 200 m du local de mesure : forage Ø160, tube crépiné 110/125, prof. 11 m.

Pour des raisons de mise hors gel et pour se prémunir du vandalisme, les têtes de piézomètres, les conduites hydrauliques et les câbles électriques passent dans des fourreaux cannelés à 1 m de profondeur (Figure 65). Chaque point de mesure (piézomètre) est muni de sa propre conduite de refoulement et d'une alimentation électrique triphasée pour la pompe immergée 4".

Figure 65 : *Réalisation des tranchées à la pelleteuse pour l'enfouissement de la conduite de refoulement et de l'alimentation électrique*

Les 3 pompes immergées 4" sont identiques, il s'agit de matériel FLYGT 4FX 2-10 Triphasé de 0,55kW pour 2 m^3/h de débit nominal. 3 sondes de niveau disposées dans le piézomètre et reliées à un boîtier électrique dans le local assurent la protection contre la marche à sec de chaque pompe. Les conduites de refoulement sont de type "eau potable" en polyéthylène haute densité ∅ 25 mm (pression nominale PN16 bars).

A l'intérieur du local de mesure, les boucles hydrauliques se poursuivent en conduites rigides en polypropylène soudé (Figure 66). En suivant le cheminement hydraulique depuis chaque arrivée de piézomètre, on trouve :

- ✓ une dérivation vers l'exhaure [ex], équipée d'une électrovanne [ev] (régénération);
- ✓ un prolongement vers la conduite du fluorimètre équipé d'un filtre [f], d'une vanne pointeau [vp] pour le bridage du débit et d'une électrovanne [ev].

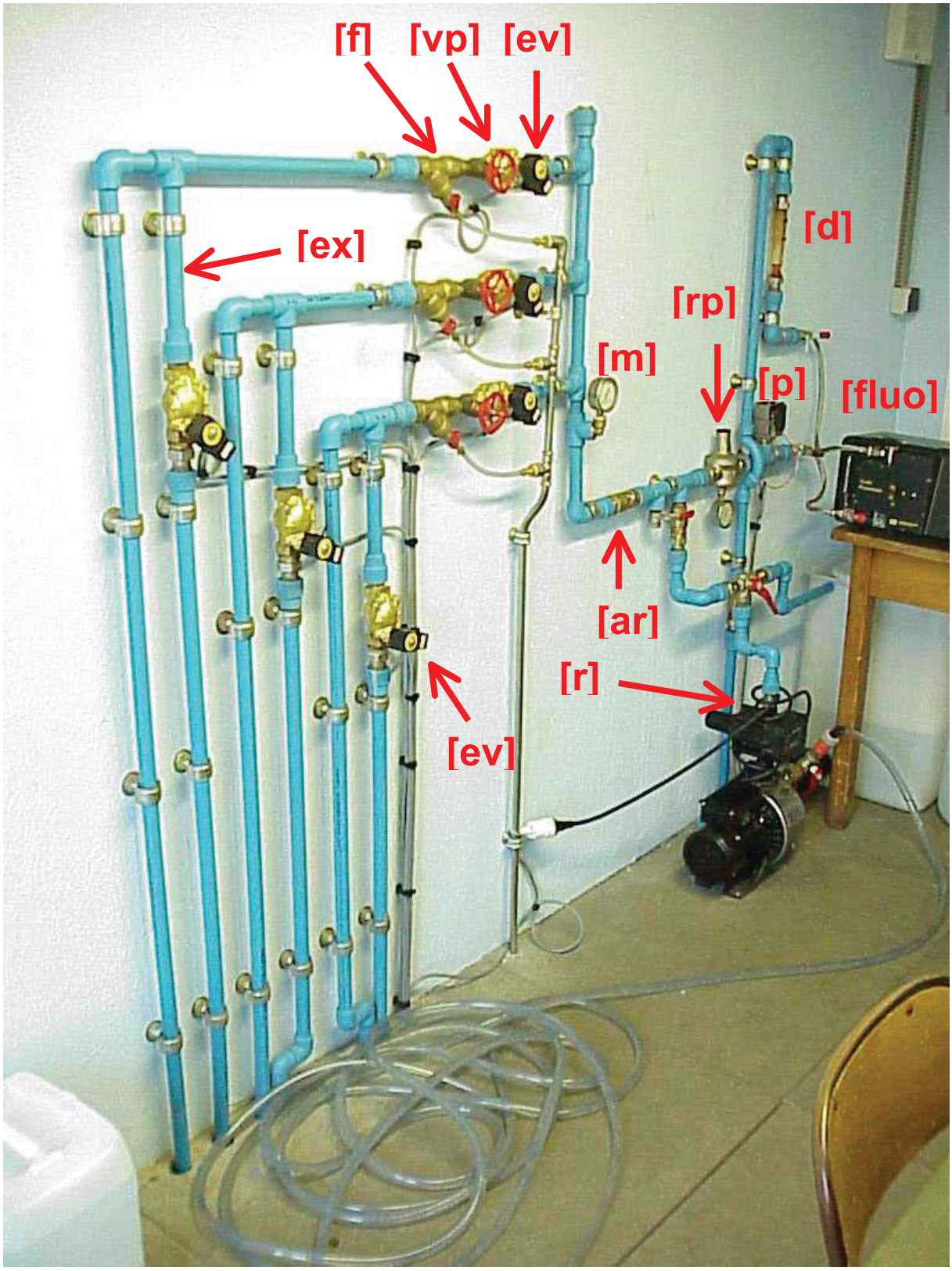


Figure 66 : *Plomberie polypropylène et équipements à l'intérieur du local de mesure*

La conduite principale du fluorimètre, vers laquelle convergent les 3 arrivées des piézomètres, est équipée successivement : d'un manomètre [m], d'un clapet anti-retour [ar], d'un piquage pour le rinçage de la cellule du fluorimètre [r], d'un réducteur de pression réglé à 0,8 bars [rp] (protection de l'analyseur), d'un pressostat de sécurité contre les surpressions [p], du fluorimètre [fluo], du débitmètre [d] et enfin de l'exhaure. Le rinçage [r] de la cellule se fait avec l'eau permutée stockée dans deux réservoirs, soit plus de 100 litres de réserve. Une pompe en assure la circulation et un by-pass muni d'une vanne 3 voies (refoulement dans le réservoir) permet le réglage du débit (50l/h pour le rinçage de la cellule).

Le jeu d'électrovannes piloté par la centrale d'acquisition assure la sélection des points de mesure et déclenche le processus de rinçage après chaque analyse. Les débits de prélèvements durant l'analyse sont stabilisés à 250 l/h, la réponse du fluorimètre durant le rinçage de la cellule (eau distillée) permettra l'appréciation d'une éventuelle dérive de l'analyseur.

II.8.5.1.2. Boucles pneumatiques

Comme pour les eaux, les cannes de prélèvement sont équipées de boucles pneumatiques enterrées (cannes de prélèvement, conduites, pompe d'aspiration, électrovannes et analyseurs) pour l'acheminement des échantillons au local d'analyse, puis mesure des teneurs en benzène par PID (Photo Ionization Detector) et en biogaz qui indiquera le taux de biodégradation des polluants.

Cinq points de mesure, G1, G2, G3, G4 et G5 sont équipés de ces chambres enterrées à 1,50 m de profondeur environ pour l'aspiration des gaz en zone non saturée à 250 m du local de mesure.

Représentées sur la Figure 67, les cannes de prélèvement sont constituées d'un tube PVC crépiné fermé par un bouchon muni d'un embout de raccordement pour la conduite pneumatique. Cette dernière en polypropylène ($\varnothing_{int}$ 1/8" x $\varnothing_{ext}$ 1/4" x ep 1/16") passe dans les fourreaux enterrés jusqu'au local de mesure (1 conduite pour chaque canne de prélèvement). Les échantillons de gaz sont prélevés par aspiration grâce à une pompe à vide située dans le local de mesure.

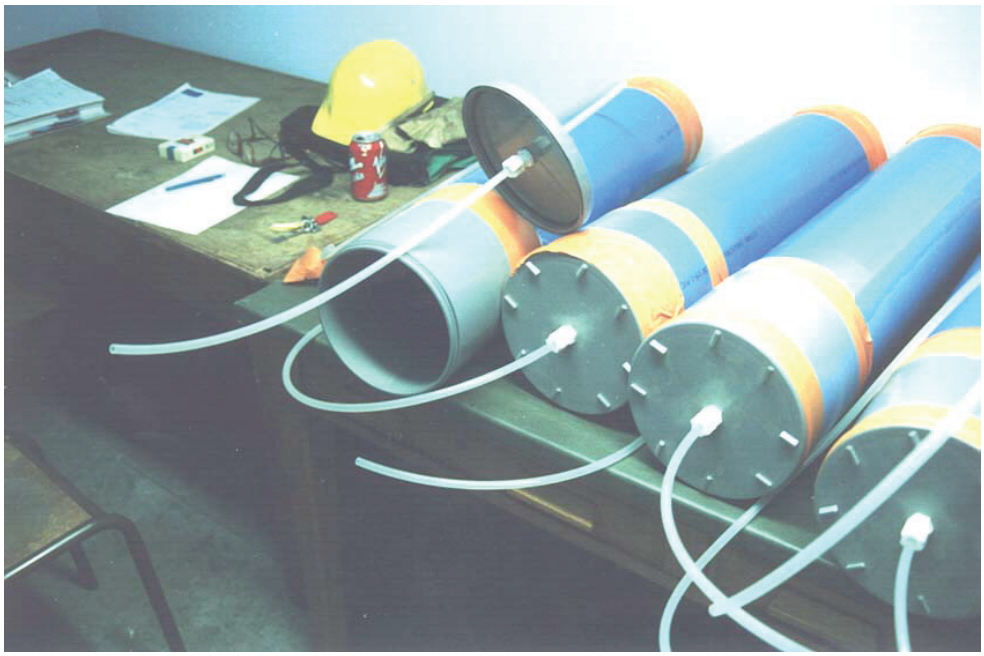


Figure 67 : *Cannes de prélèvement de gaz*

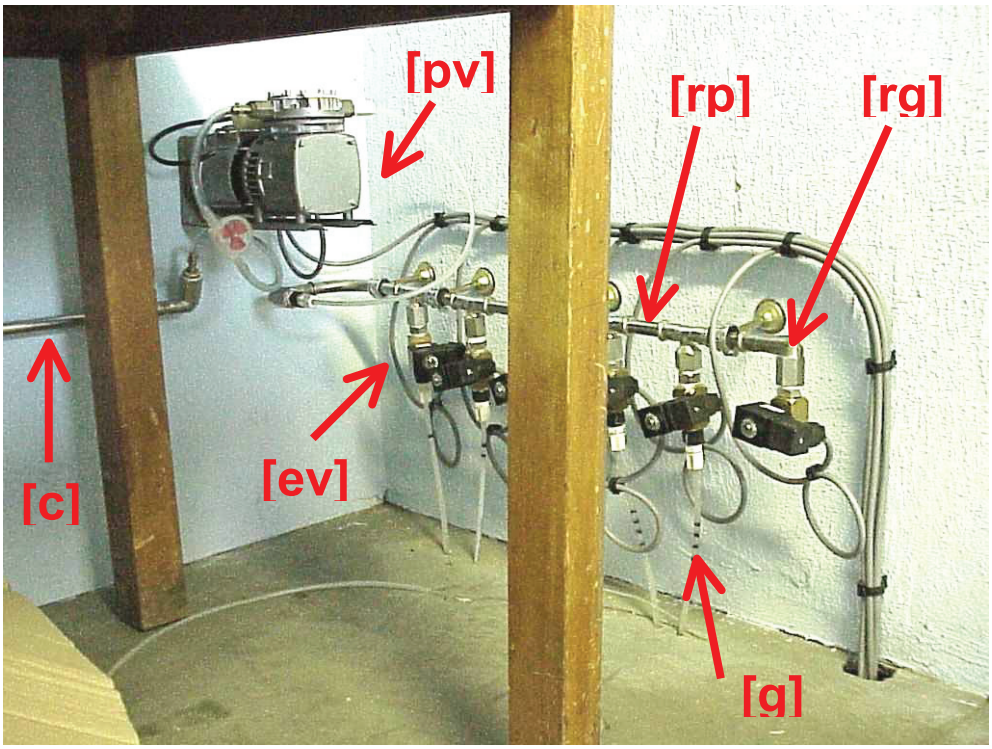


Figure 68 : *Rampe de convergence gaz avec pompe à vide*

Les cinq conduites de gaz [g] qui constituent les boucles pneumatiques, convergent sur une rampe [rp] à l'intérieur du local de mesure. Une prise d'air atmosphérique [rg] assure le rinçage des conduites et l'estimation de la déviation des analyseurs. A chacune des arrivées [g], une électrovanne [ev] (24 V, normalement fermée) permet la sélection de la ligne ou de la purge [rg] (6ème électrovanne). La pompe [pv] a été positionnée dans le local afin d'éviter l'installation d'appareillages électriques supplémentaires en extérieur. Il s'agit d'une pompe à vide à membrane KNF de type N022ATE, 220 V. Dans ces conditions d'utilisation, son débit atteint 2 l/min pour une pression de 400 mbars absolue à l'admission et atmosphérique au refoulement. A l'aval de la pompe, la boucle pneumatique se poursuit en conduite inox [c] avec deux pontages pour alimenter les analyseurs. Ces derniers étant munis de leur propre pompe d'aspiration, ils régulent eux-mêmes leur débit d'aspiration d'où l'impossibilité de les brancher en direct. Toutefois, l'analyseur de biogaz ne détruisant pas le gaz, son refoulement a été re-dirigé sur la conduite inox de la boucle pneumatique juste à l'amont du piquage du PID (Figure 61) de façon à conserver le débit prélevé, déjà lourdement restreint par les pertes de charges à l'aspiration. Dans ces conditions, le débit de prélèvement est d'environ 1 l/min.

II.8.5.2. Centrale d'acquisition

II.8.5.2.1. Matériel

La centrale d'acquisition Datataker (DeLogger DT500, www.datataker.com) permet la récupération et la mise en mémoire des résultats d'analyses ainsi que l'automatisation du dispositif. Ce matériel standard dispose de 10 entrées analogiques, 3 compteurs d'impulsions plus 4 entrées/sorties supplémentaires pouvant actionner des récepteurs externes. Une mémoire interne permet le stockage de 13 000 mesures et du programme de gestion des automatismes (alarmes).

Ce matériel initial a été complété par :

- ✓ le module d'extension avec 10 entrées analogiques, 5 contacteurs secs et 5 entrées/sorties supplémentaires ;
- ✓ la carte mémoire (externe) supplémentaire, 90 000 mesures ;
- ✓ le logiciel de communication DeLogger Pro ©.

Au total, le dispositif d'acquisition (centrale d'acquisition + extensions) dispose donc de :

- 20 entrées analogiques pour l'acquisition des mesures ;
- 5 contacteurs secs pour piloter les 5 pompes (3 pompes immergées + pompe rinçage + pompe gaz) ;
- 9 entrées/sorties configurées en sorties pour piloter les 12 électrovannes (3 sorties pilotent 2 électrovannes montées en série) ;
- 1 mémoire interne pour la programmation (instructions de commande) ;
- 1 carte mémoire externe pour l'enregistrement et le stockage des données.

II.8.5.2.2. Acquisition des résultats

Les entrées analogiques de la centrale d'acquisition sont constituées de borniers sur lesquels viennent se connecter les fils provenant des analyseurs. Chaque voie compte 4 cosses : une masse et trois phases. Il est donc possible de connecter un capteur à 4 fils (fréquent) ou de mesurer jusqu'à 3 tensions sur une même voie. Par scrutations répétitives, la centrale évalue le signal (un courant, une tension, une résistance, etc..) puis transforme l'information en données physiques en fonction de la courbe d'étalonnage propre à l'analyseur. La gestion de la centrale d'acquisition (programmation des alarmes, des scrutations et le traitement des données) se fait par ordinateur via une connexion RS232 au moyen du logiciel de communication DeLogger Pro © de Datataker. Ce dernier propose une interface interactive, sous forme d'icônes en lieu et place d'une programmation classique en langage machine.

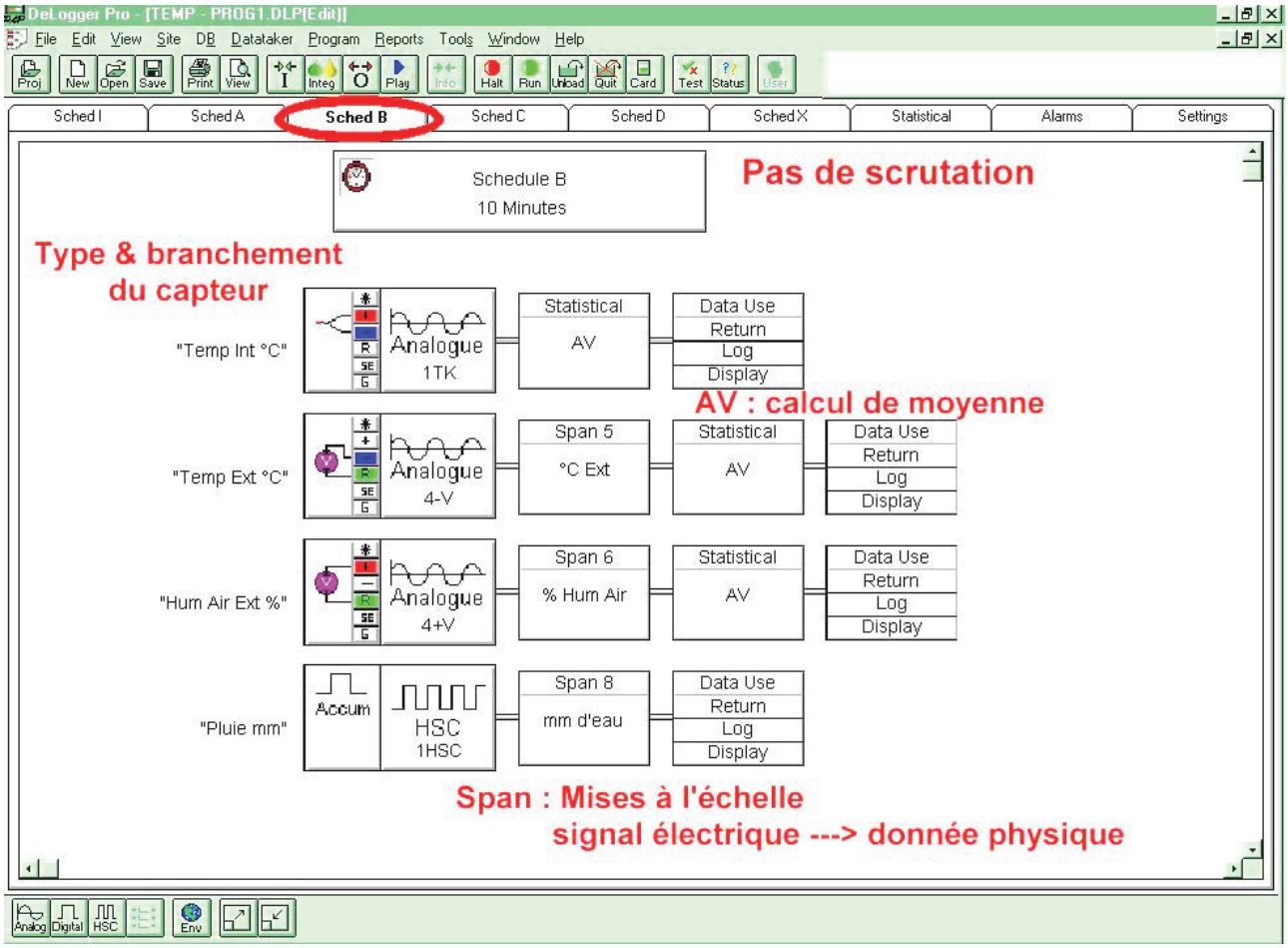


Figure 69 : *Exemple d'une fenêtre de programmation sous DeLogger Pro © :*
scrutation avec un pas de : 10 min ;
entrée analogique 1TK (thermocouple type K) : température intérieure ;
entrée analogique 4-V (mesure tension) température extérieure ;
entrée analogique 4+V (mesure tension) : humidité air extérieur ;
entrée compteur d'impulsion 1HSC: précipitation.
AV : signifie un acquisition par moyenne de plusieurs sous acquisitions
SPAN : indique la règle de mise à l'échelle à utiliser pour transformation du signal en indicateur physique

La Figure 69 reproduit l'écran où sont déclarés les capteurs. Plusieurs onglets permettent des vitesses de scrutations différentes, ici 10 minutes pour la scrutation B par exemple. Pour chaque capteur, il faut spécifier son type et choisir le mode de branchement adapté :

- thermocouple type K sur la voie 1 pour la température intérieure ;
- mesure d'une simple tension sur la voie 4 pour la température extérieure (-) et l'humidité de l'air (+) ;
- accumulation d'impulsions sur le compteur 1 pour le pluviomètre.

Ensuite, il convient d'associer une mise à l'échelle du signal (pré-programmable dans l'onglet "settings") afin de le transformer en grandeur physique (e.g. : pour l'humidité, 0 V correspond à 0 % et 1 V à 100 % d'humidité). Ensuite, il est possible d'effectuer toutes sortes de manipulations logiques ou mathématiques sur les données, comme par exemple extraire le temps de dépassement d'un seuil, calculer une moyenne, retenir les extrema, etc.… Ici, la fonction moyenne est largement utilisée, elle permet de s'affranchir d'une mesure ponctuelle toutes les 10 minutes au profit de la moyenne d'une multitude d'acquisitions effectuées toutes les 4 secondes et temporairement mémorisées. Dans tous les cas, un menu déroulant intuitif aide à la programmation de toutes ces commandes.

Chaque donnée est ensuite stockée sur la carte mémoire et récupérable soit par connexion directe avec un ordinateur (câble RS232) ou par téléchargement via un modem (ligne télécom).

II.8.5.2.3. Pilotage des automatismes

L'outil est autonome, du moins en ce qui concerne le déclenchement des séquences d'analyse au pas de temps désiré. La centrale d'acquisition permet cette gestion des automatismes en actionnant les relais thermiques, affectés à chaque équipement électrique, à une heure de consigne. La programmation se fait de la même façon que pour les scrutations des capteurs sous DeLogger Pro © (Figure 70), mais en utilisant les fonctions "alarmes" qui déclenchent, au moment voulu, les sorties de la centrale d'acquisition. Les alarmes sont normalement destinées à émettre un signal lorsqu'une entrée scrutée dépasse un seuil de consigne. Pour exploiter ces fonctionnalités en automate, il suffit :

- d'utiliser l'horloge interne comme entrée à scruter ;
- d'utiliser des consignes temporelles ;
- d'envoyer des signaux électrique vers les sorties analogiques ou actionner les contacteurs secs en cas de dépassement des consignes.

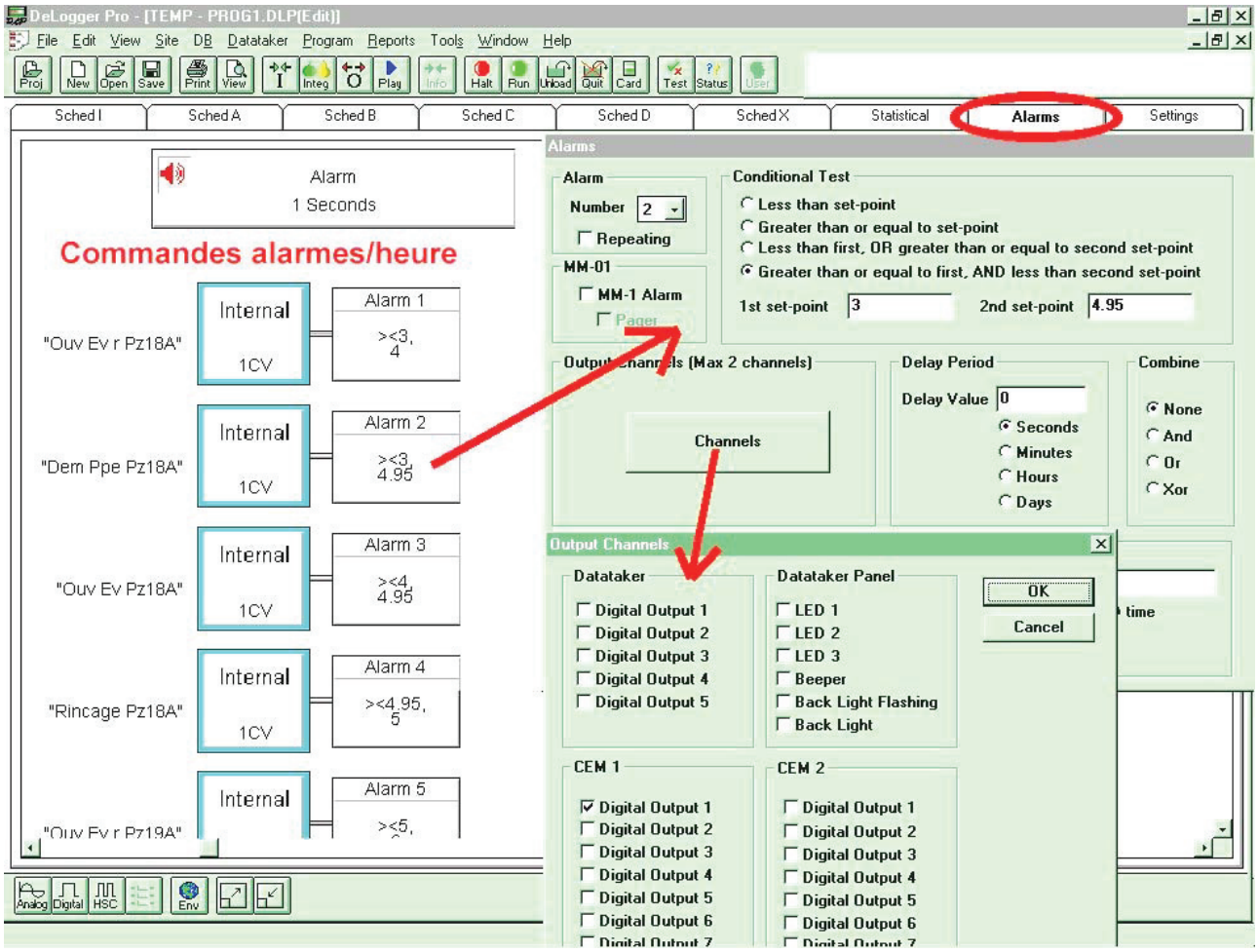


Figure 70 : *Exemple de fenêtre de programmation des commandes (alarmes) sous DeLogger Pro ©*

La programmation des alarmes, limitée à 20, est présentée sur la Figure 70 avec pour exemple la cas de l'alarme 2 (déclenchement de la pompe immergée du Pz18A).

Toutes les alarmes scrutent chaque seconde la voie variable 1 (Internal 1CV) reproduction numérique en base 10 de l'horloge interne. Toutes deux sont déclarées en scrutation "A" avec comme condition : valeur de la voie variable 1CV = valeur de l'horloge interne avec un rafraîchissement des données chaque seconde (scrutation A). Ensuite chaque alarme scrute la valeur d'1CV et compare sa valeur avec les consignes temporelles programmées de déclenchement (e.g. pour l'alarme 2 "démarrage de la pompe Pz18A": déclenchement entre 3h00 [3,00 h] et 4h57 [4,95 h], soit lorsque $3{,}00 \leq 1CV < 4{,}95$). Enfin, dans la plage horaire de consigne, les alarmes actionnent les sorties externes (contacteurs secs ou sorties analogiques) qui commandent les relais électriques des appareillages et donc leur mise en service (e.g. pour l'alarme 2 actionner le 1er contacteur sec [Digital Output 1] du module d'extension 1 [CEM 1]). Le câblage électrique extérieur transmet ensuite la commande en basse tension (24 V DC) entre le contacteur sec du Datataker et le relais thermique de puissance (e.g. pour l'alarme 2 : démarrage de la pompe immergée en Pz18A).

II.8.6. Mode Opératoire

II.8.7. Analyse de l'eau

Trois points de mesure sont échantillonnés : le Pz18A (250 m de conduite), le Pz19A (60 m de conduite) et le Pz9A (200 m de conduite).

Le prélèvement d'eau dans les piézomètres respecte la procédure d'échantillonnage généralement utilisée pour que l'échantillon soit représentatif de la nappe : purge d'au moins cinq fois le volume du piézomètre [Lecomte, 1995]. Avec des ouvrages en 4" et une colonne d'eau d'une dizaine de mètres, le volume d'eau à purger pour chaque piézomètre est de 500 litres au maximum. Les pompes 4" FLYGT 4FX2-10T immergées sont d'un débit nominal de 2 m^3/h et 500 l/h minimum en bout de conduite de refoulement avec les pertes de charge en ligne. Avec 1 heure de purge par piézomètre au débit maximum, les conditions de purge sont donc largement respectées. Les essais d'analyse *in situ* avec fluorimètre UV ont montré que la mesure se stabilise relativement vite, en une dizaine de minutes, et que le débit idéal est de 200-300 l/h. Au-delà, l'énergie d'aspiration devient trop importante et mobilise les particules chargées en HAP non mobilisables en écoulement naturel (quelques dizaines de centimètres par jour suivant la charge hydraulique). Les paramètres retenus pour la phase d'analyse des eaux par fluométrie sont 250 l/h de débit sur une durée de 30 minutes. Toutefois, les conduites PN16 ∅ 25 mm contiennent un volume d'eau résiduaire de 120-130 litres pour les plus longues. Lors du passage de la phase de régénération à celle d'analyse, le débit est abaissé à 250 l/h mais ce volume résiduaire, prélevé au débit maximum, reste présent dans les conduites. Il convient donc d'attendre son évacuation avant de prendre en compte la valeur de l'analyse, soit une demi-heure de décalage environ. Avec une durée d'analyse effective fixée à 30 minutes, cela porte la phase d'analyse à 1heure (30 min d'acheminement plus 30 min d'analyse effective).

Ainsi, pour chaque piézomètre, il a été retenu une heure de fonctionnement de la pompe à plein régime pour la régénération des eaux du piézomètre plus 1 heure d'analyse et, en fin de cycle, 3 minutes de rinçage à l'eau permutée pour le nettoyage de la cellule et le contrôle du zéro (échantillon blanc).

Toutefois, à l'usage il faudra veiller à ce que ces volumes de prélèvements n'induisent pas une accélération de la migration des polluants vers le piézomètre par dépression ou encore à ne pas transformer le puisard en source polluante (rejet HAP). S'il convient lors d'un prélèvement ponctuel dans un piézomètre d'en extraire 5 fois le volume pour régénérer son contenu et ainsi récupérer une eau représentative de la nappe, ce principe n'est peut-être pas transposable aux prélèvements quotidiens. En effet, les recommandations suivies [Lecomte, 1995] concernent des prélèvements dans des piézomètres peu sollicités de sorte à évacuer l'eau stagnante du piézomètre et la remplacer par de l'eau provenant effectivement de la nappe. Ce n'est pas le cas ici. Avec un pompage quotidien, l'eau séjourne dans le piézomètre une journée tout au plus. Les essais conduits en laboratoire pour connaître l'évolution dans le temps de l'indice de fluorescence des eaux brutes dans des échantillons conservés à température ambiante et à l'abri de la lumière montrent une diminution de 10% environ (tous les résultats sont présentés en Annexe 17). En phase de suivi, une diminution de la phase de régénération sera donc étudiée afin de diminuer les volumes pompés et donc l'entraînement artificiel des HAP.

II.8.8. Analyse du gaz

Cinq points de mesure doivent être échantillonnés : G1, G2, G3, G4 et G5 disposant chacun de 200-250 m de conduites enterrées. Les cannes de prélèvement se remplissent d'elles-mêmes en captant l'air dans leur environnement immédiat. Constituées de tubes crépinés 4" d'un mètre de haut, leur volume est d'environ 10 litres. L'air est ensuite aspiré par la pompe à vide du local de mesure au travers de conduites en polypropylène 1/8" soit un volume résiduaire dans les conduites de 1,6 à 2 litres au plus. La pompe à vide de type KNF N022ATE rend au mieux un débit de 2 l/min, voire moins sur certaines lignes en fonction de perte de charges singulières parasites. Pour l'instant, les débits d'air sont contrôlés avec de simples indicateurs visuels. Cela permet de contrôler visuellement que le flux d'aspiration reste suffisant (situé entre 1,3 et 2 l/min) pour les besoins des analyseurs (1 l/min minimum).

Le gaz sera aspiré successivement dans chaque canne avec au préalable un prélèvement d'air ambiant pour purger les conduites du gaz précédemment échantillonné. Avec débits de l'ordre de 1 l/min, le volume résiduaire des conduites (1,6 à 2 litres) est rapidement épuisé (2 minutes environ) ce qui implique que le gaz réellement prélevé dans les cannes arrive très rapidement aux analyseurs. Une période de 10 minutes de régénération est donc très largement suffisante. On supposera dans un premier temps que le premier flux de gaz aspiré est représentatif de l'air en zone non saturée. Par la suite, en cas de continuité de l'aspiration, des cheminements d'air depuis la surface peuvent apparaître en raison d'une étanchéité non garantie entre les cannes et la surface du terrain naturel. Une durée d'une heure de prélèvement par canne de mesure, donc 10 minutes de régénération amont, sera toutefois programmée pour confirmer ou non cette hypothèse.

II.8.9. Programmation des acquisitions

Les acquisitions des analyses des paramètres généraux (les températures, l'humidité, la pluviométrie, etc..) et des gaz (CH_4, CO_2, O_2) se font toutes les 10 minutes par l'enregistrement d'une moyenne de valeurs mesurées toutes les 4 secondes. Cette fréquence de 4 secondes a été choisie car supérieure aux durées d'analyses et suffisamment petite pour avoir de nombreuses mesures et pouvoir ainsi en extraire une moyenne sur 10 minutes. Par contre, l'acquisition de la moyenne des analyses HAP par fluorimétrie se fait toutes les 2 minutes, une moyenne également, afin de pourvoir enregistrer la réponse de l'appareil durant la phase de rinçage qui ne dure que 3 minutes entre chaque piézomètre. Un intervalle de temps de 10 minutes aurait imposé un rinçage long (12-15 minutes) incompatible avec les possibilités de stockage et d'approvionnement de l'eau permutée.

L'acquisition des réponses des analyseurs se fait avec les fréquences indiquées ci-dessus, y compris lors des périodes mortes où aucun échantillon n'est acheminé au local. Ces valeurs massivement enregistrées servent à suivre pas à pas le déroulement des automatismes et la stabilité des périodes d'attente entre chaque cycle afin de vérifier le bon fonctionnement des appareils. Ceci est très important pour la validité des analyses et localiser les dysfonctionnements.

II.8.10. Programmation des automatismes

Le grafcet des automatismes est présenté en Annexe 19. La fréquence des analyses est d'une par jour et par point de mesure, ainsi la décomposition journalière, en heure locale, est la suivante :

- ✓ à partir de 3h00 : 1h de régénération puis 57 min d'analyse et 3 min de rinçage du Pz18A ;
- ✓ à partir de 5h00 :1h de régénération puis 57 min d'analyse et 3 min de rinçage du Pz19A ;
- ✓ à partir de 7h00 :1h de régénération puis 57 min d'analyse et 3 min de rinçage du Pz9A ;
- ✓ à partir de 9h45 :15 min de purge gaz ;
- ✓ à partir de 10h : 10 min de régénération puis 50 min d'analyse en G1 ;
- ✓ à partir de 11h :10 min de régénération puis 50 min d'analyse en G2 ;
- ✓ à partir de 12h :10 min de régénération puis 50 min d'analyse en G3 ;
- ✓ à partir de 13h :10 min de régénération puis 50 min d'analyse en G4 ;
- ✓ à partir de 14h :10 min de régénération puis 50 min d'analyse en G5 ;
- ✓ à partir de 15h :15 min de purge gaz.

Ce choix n'est pas figé, il peut être adapté à tout moment par modification du programme (*in-situ* et/ou par téléchargement).

III. Exploitation des résultats

III.1. Acquisition et visualisation des mesures brutes d'analyses

Rappelons que les paramètres sélectionnés pour un enregistrement en continu sont :

- la température extérieure ;
- la pluviométrie ;
- la pression atmosphérique ;
- l'humidité de l'air extérieur ;
- l'humidité du sol ;
- les biogaz dans l'air de la zone non saturée ;
- les BTEX dans l'air de la zone non saturée
- l'indice de fluorescence UV rapportée au naphtalène dans l'eau de la zone saturée.

La récupération des données enregistrées se fait par connexion distante via modem ou directe sur site via le port RS232 d'un ordinateur portable. Les mesures brutes ainsi récupérées sur une période donnée sont stockées sous forme de fichier historique DeLogger Pro © consultable sur n'importe quel ordinateur équipé de cette application.

La visualisation peut se faire soit sous forme de tableau de chiffres (Figure 71) ou, de façon plus conviviale, au travers de graphiques synoptiques adaptés (Figure 72 et Figure 73). Dans les deux cas, il est possible d'afficher une situation présente (temps réel) ou historique en parcourant les enregistrements passés stockés dans un fichier.

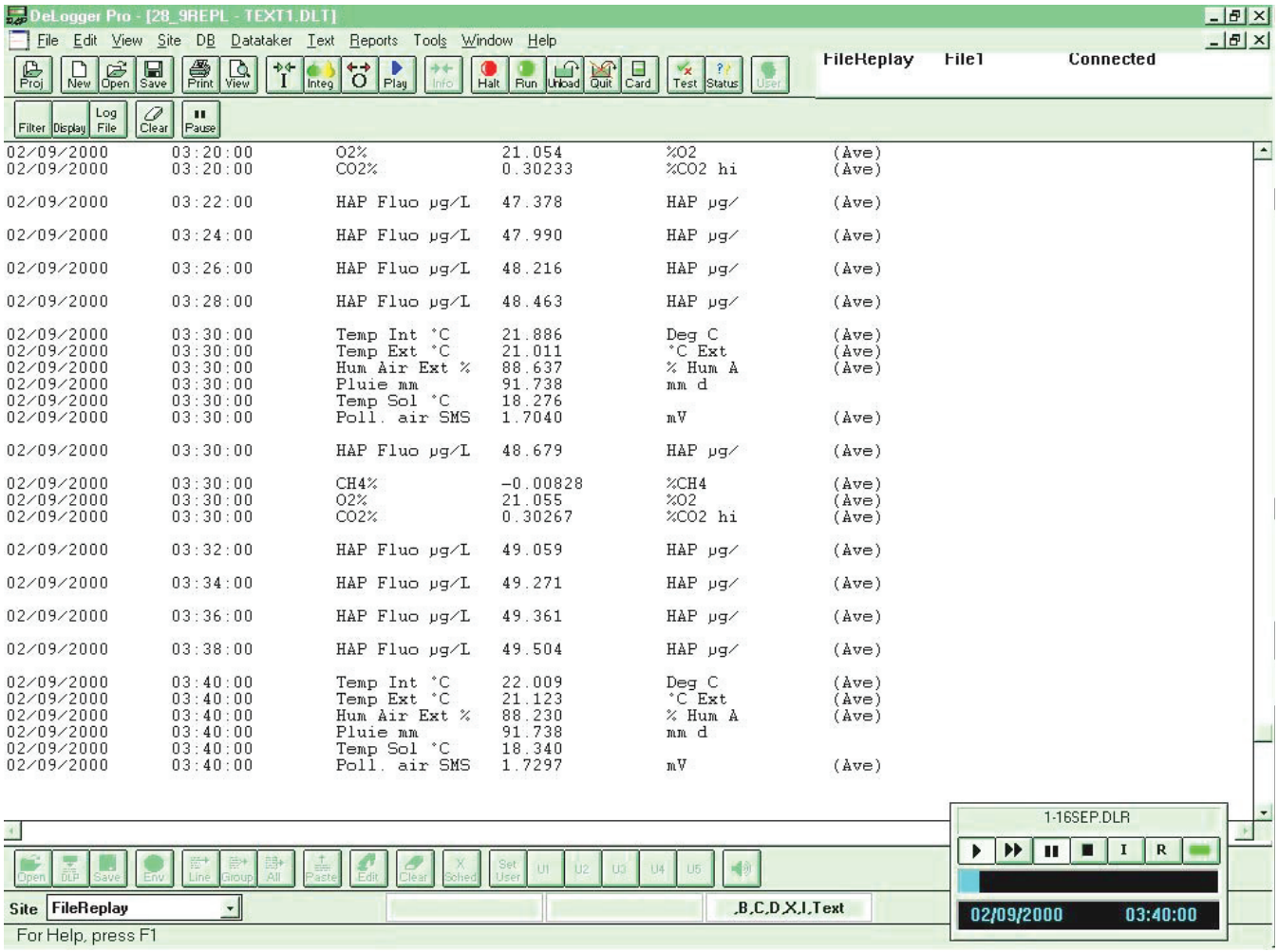


Figure 71 : *Visualisation sous format "texte" des acquisitions sous DeLogger Pro ©*

Le tableau de la Figure 71 est la transcription des enregistrements du 1er au 2 septembre 2000 exportables en données ASCII. Il apparaît la date, l'heure locale, le paramètre mesuré, la valeur, l'unité et enfin le mode de calcul ("Ave" pour moyenne : sur 2min pour la fluorescence et 10min pour le reste des enregistrements). Le défilement des acquisitions se fait avec les boutons de commande en bas à droite. Aux fréquences de mesure citées au chapitre précédent correspondent donc des valeurs d'analyses qui sont en général des moyennes sur un intervalle de temps afin de s'affranchir de la composante aléatoire (erreurs) des mesures ponctuelles (sauf pour le pluviomètre qui émet des impulsions à chaque basculement d'auget).

On rappelle les intervalles de temps utilisés : toutes les 2 minutes pour la mesure de la fluorescence UV et toutes les 10 minutes pour les mesures de concentrations en biogaz et paramètres généraux

La Figure 72 montre l'évolution de la fluorescence UV le 5 octobre 2000 entre 2h30 et 10h30. Dans ce laps de temps, les automatismes permettent l'analyse par le fluorimètre des eaux pompées dans les trois piézomètres immédiatement suivis de trois rinçages de la cellule. Les valeurs journalières retenues seront prises en fin d'analyse lorsque l'eau prélevée à fort débit aura été évacuée et que la mesure sera stable.

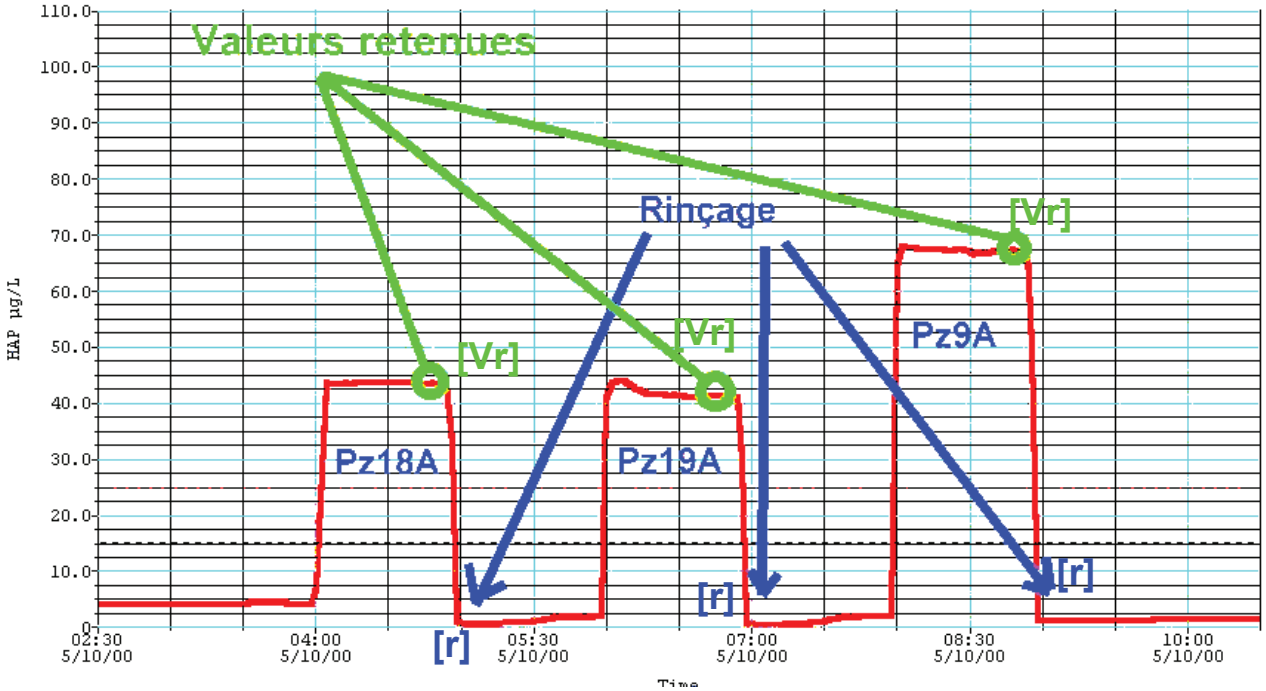


Figure 72 : *Visualisation analyses de fluorescence sous DeLogger Pro ©* :
[r] : rinçage ; [Vr] valeur retenue

La Figure 73 montre l'analyse des biogaz dans l'air prélevé dans les 5 cannes de prélèvement le 5 octobre 2000 entre 9h00 et 17h00 avec l'aspiration d'air ambiant en début et fin de cycle pour purger les conduites. Conformément aux hypothèses du II.8.8, p125, les valeurs journalières retenues seront prises en début d'analyse avant les perturbations dues aux éventuelles aspirations parasites d'air ambiant. La poursuite du prélèvement et de l'analyse sur une durée totale d'une heure confirme effectivement ces suppositions puisqu'on note une augmentation de la concentration en oxygène et une diminution de la concentration en dioxyde de carbone caractéristiques d'une entrée d'air parasite. Le volume de gaz résiduel des conduites étant très faible, on peut penser que l'analyse sur les 10 premières minutes est une bonne caractérisation du gaz de la zone non saturée naturellement présent des cannes de prélèvement.

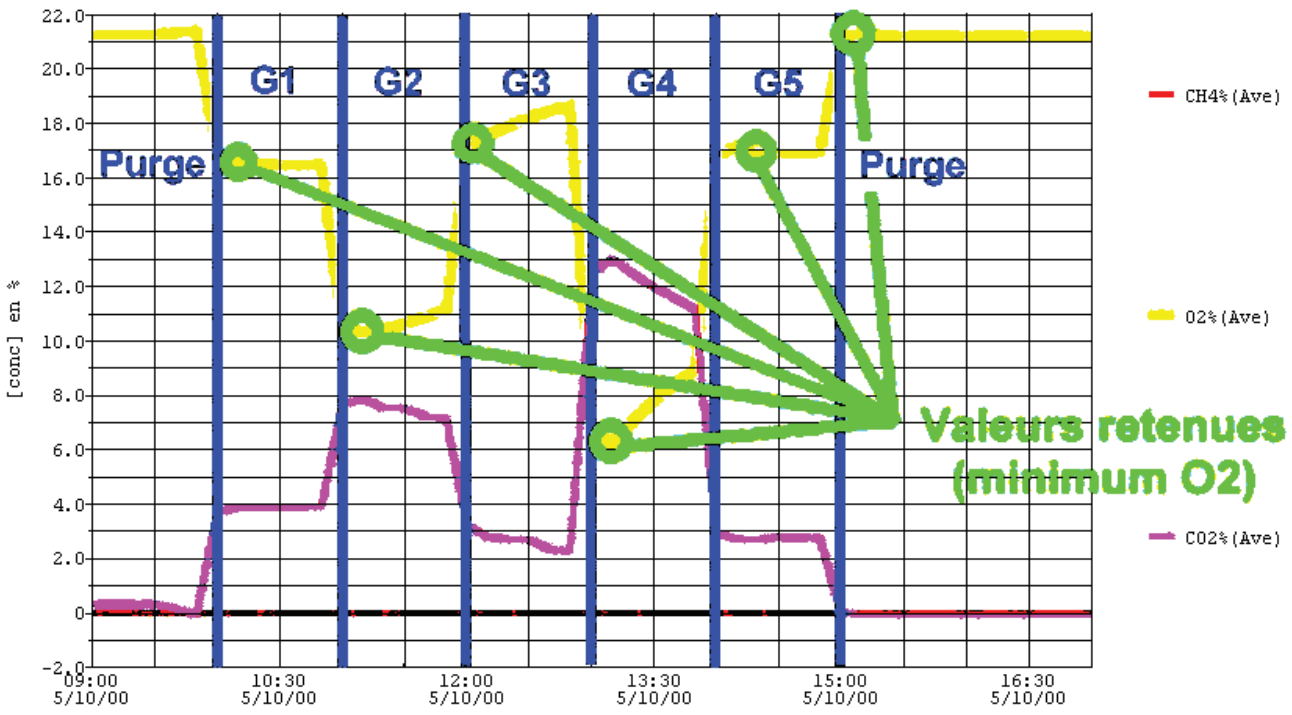


Figure 73 : *Visualisation analyses biogaz sous DeLogger Pro ©*

Les Figure 74 et Figure 75 montrent l'évolution des paramètres généraux (températures, pluie, humidité) les 2 et 3 octobre 2002. Dans ce cas il a été retenu une solution relativement simple pour apprécier la température de la journée : une mesure ponctuelle de jour à 16h00 et une de nuit à 24h00. Nous avons supposé ce principe représentatif des valeurs extrêmes, au regard des premières observations, et retenu ces deux valeurs journalières. Pour la pluie, il s'agit d'un cumul qui est mesuré.

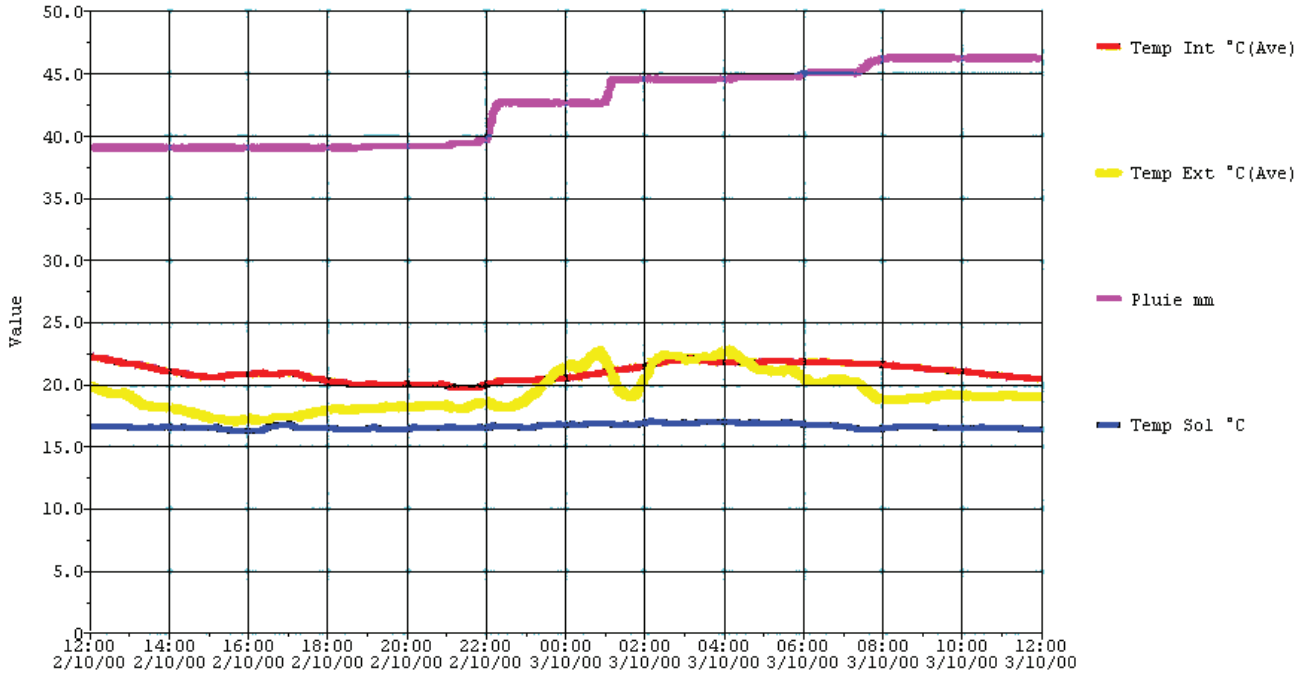


Figure 74 : *Visualisation températures/pluviométrie sous DeLogger Pro © :*
Temp Int : température intérieure du local ;
Temp Ext : température extérieure

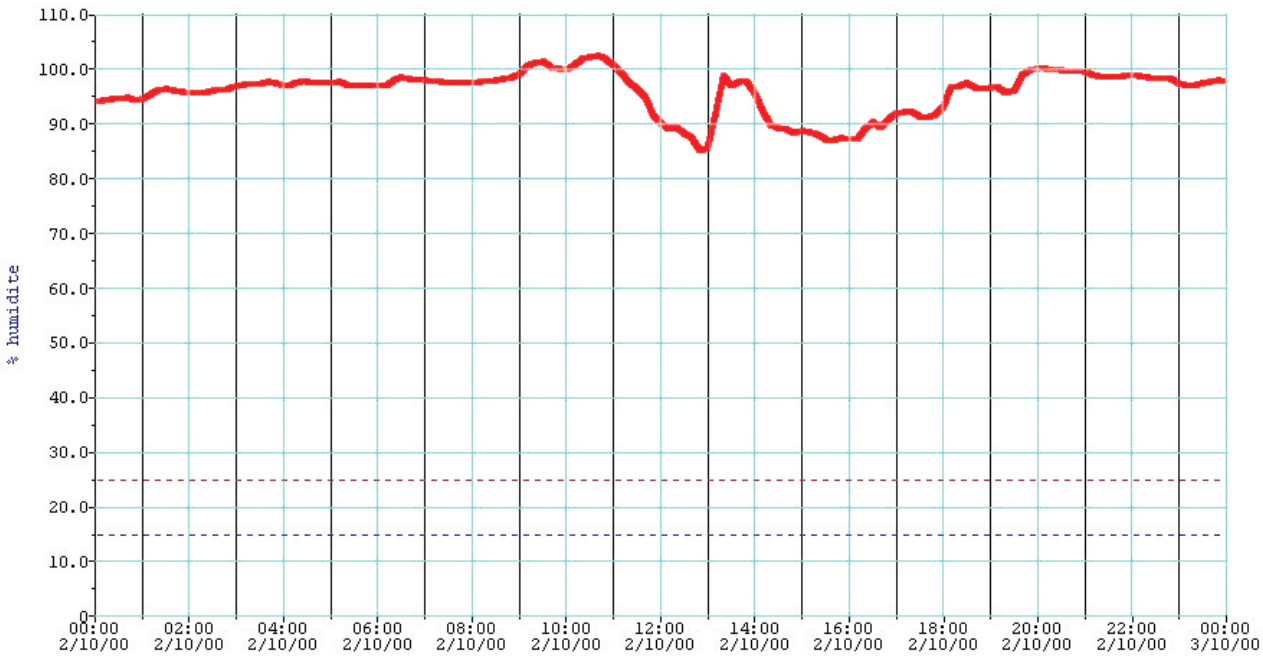


Figure 75 : *Visualisation humidité extérieure sous DeLogger Pro ©*

Le tracé de ces courbes sur une journée n'est possible qu'avec une acquisition à des pas de temps rapprochés : 2min pour la fluorescence et 10min pour les autres acquisitions. Toutes les acquisitions étant archivées sous la forme de fichier historique DeLogger Pro, il est ensuite possible de faire défiler l'information sur la période de son choix.

La finalité du Monitoring Continu est le suivi à long terme des sites pollués, c'est à dire sur plusieurs années, voire des dizaines d'années. Pour cela, une mesure journalière par point de mesure apporte suffisamment de précision pour suivre l'évolution du site dans le temps. Nous sommes en présence de deux systèmes d'échelle de temps différents : l'un journalier permettant un contrôle du bon fonctionnement du process, l'autre annuel pour le suivi de l'évolution du site. Ainsi parmi toutes les valeurs acquises dans le premier système d'échelle de temps (journalier), il ne sera retenu qu'une seule par point de mesure et par jour pour alimenter le deuxième système (annuel), soit le suivi à long terme de l'évolution des paramètres (valeurs retenues sur les Figure 72 et Figure 73). Toutefois, cette acquisition particulière (plutôt qu'une moyenne par exemple) ne peut se justifier que s'il existe une homogénéité de l'ensemble des valeurs et que les visualisations journalières des analyses ne montrent aucun incident. Cette information ainsi extraite, complétera une base de données sous tableur externe pour postraitement et restitution sous SIG.

Cette surabondance d'acquisitions en continu est impérative pour le contrôle dans le temps du bon fonctionnement du dispositif et la validation des valeurs journalières à retenir. Les courbes doivent être régulières, les permutations de points de mesure nettement marqués et les concentrations du fluide de rinçage conformes au standard (fluorescence UV nulle pour l'eau distillée et concentration de l'air ambiant conforme).

III.2. Echantillon de données brutes entre le 4 et 20 août 2000

Démarré en mai 2000, le dispositif a nécessité une phase de mise au point pour devenir réellement opérationnel depuis août 2000. Les Figure 76 à Figure 80 présentent un échantillon des premières données récupérées entre le 4 août et le 20 août 2000.

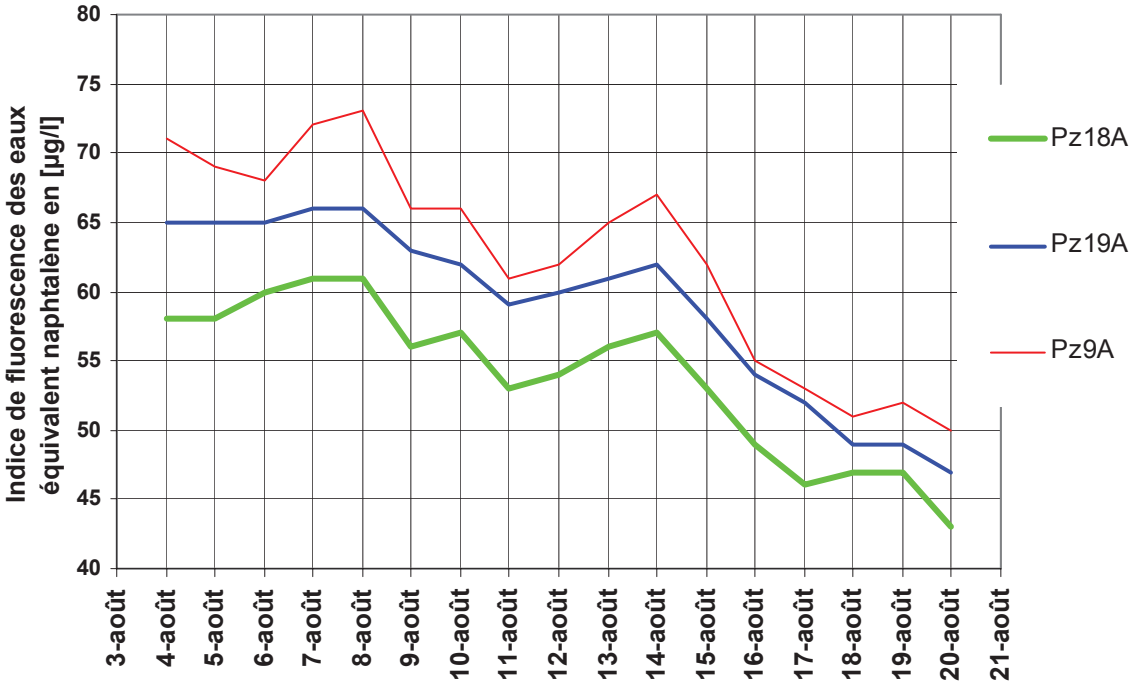


Figure 76 : *Echantillons de fluorescence brute des eaux (août 2000)*

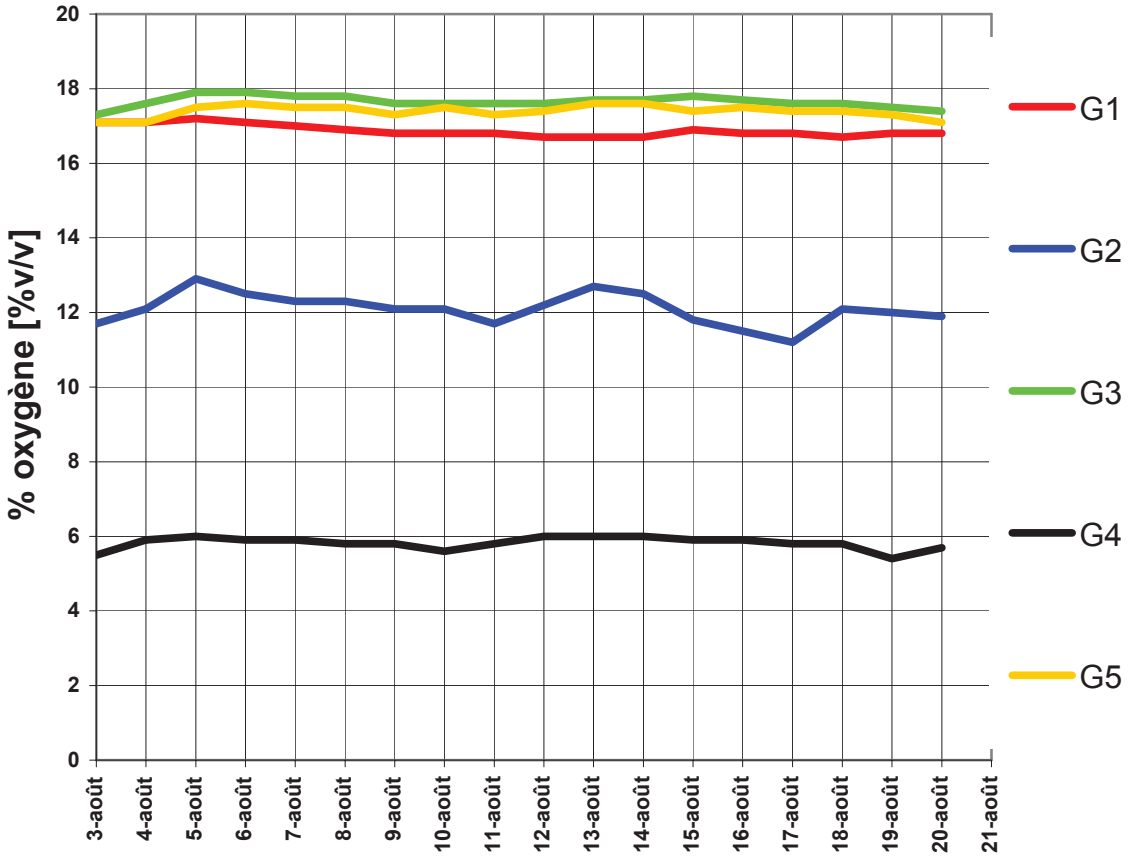


Figure 77 : *Echantillons des concentrations en oxygène [%v/v] (août 2000)*

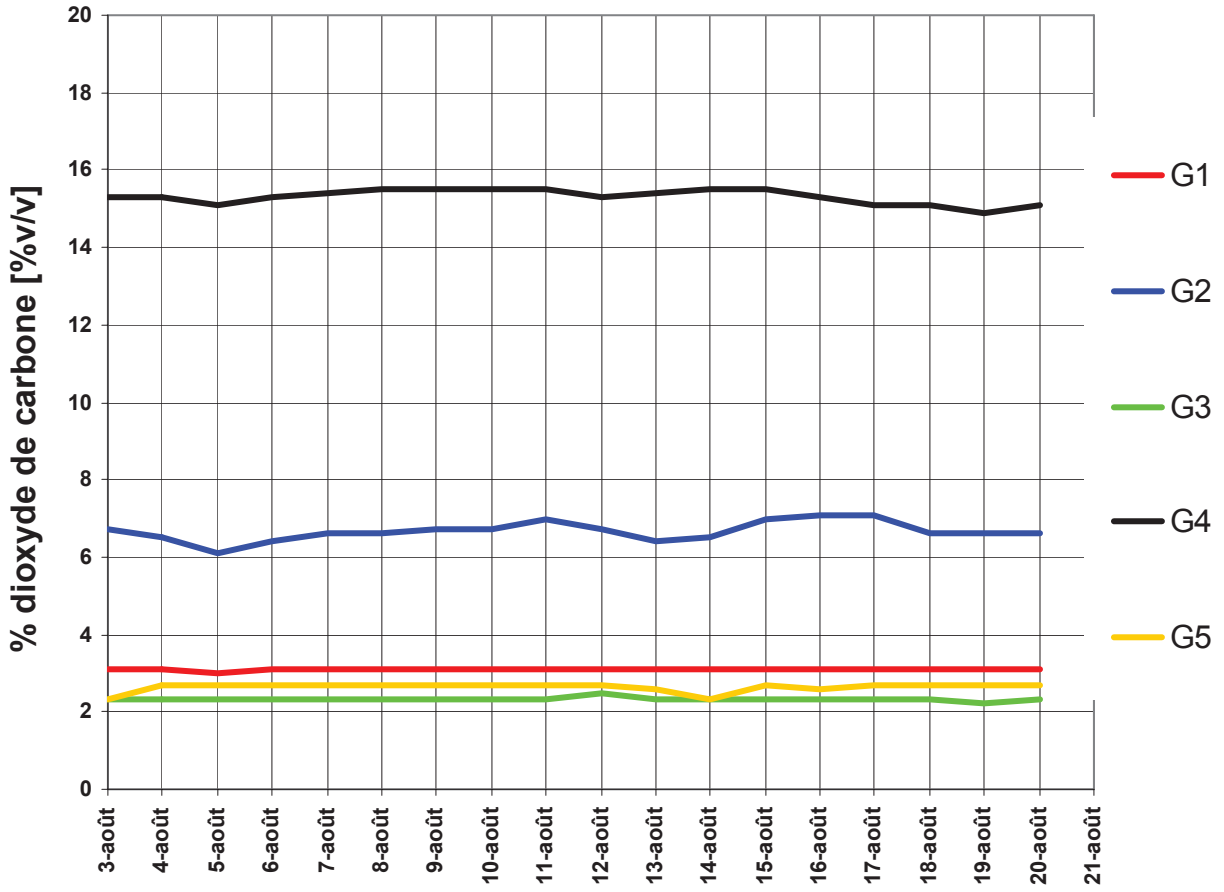


Figure 78 : *Echantillons des concentrations en dioxyde de carbone [%v/v] (août 2000)*

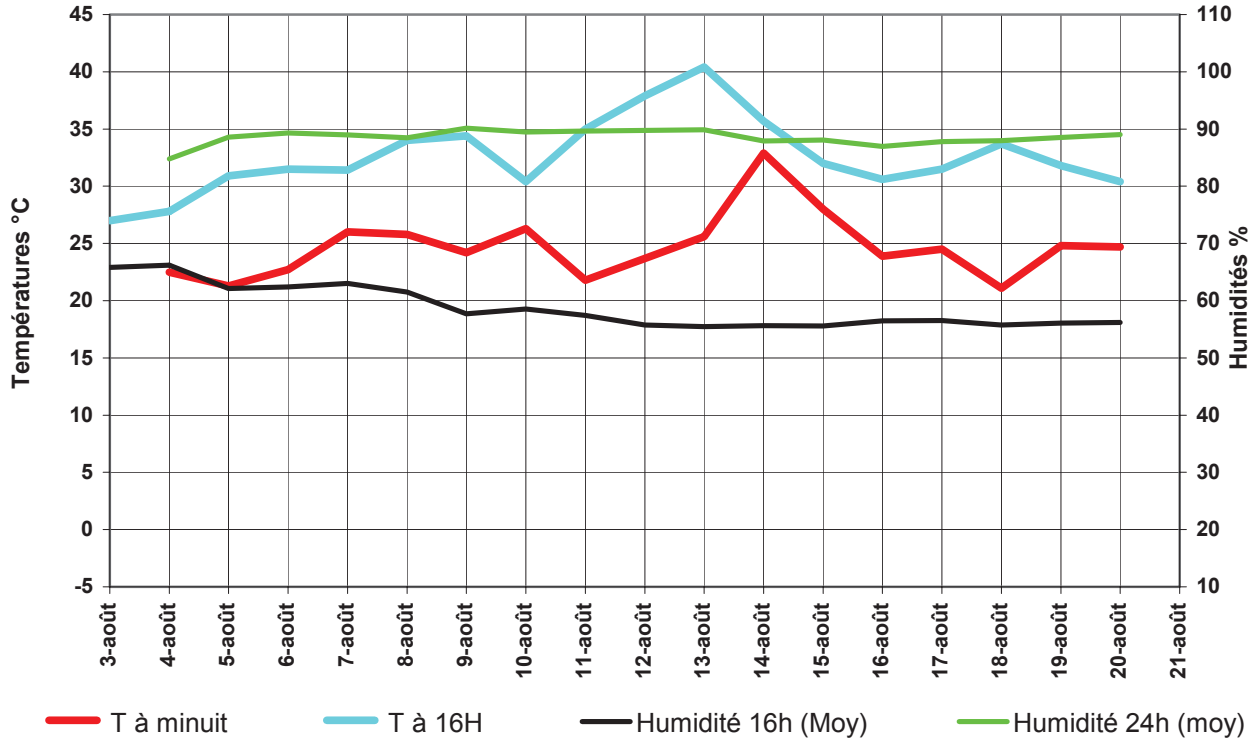


Figure 79 : *Echantillon de l'évolution des températures et humidités (août 2000)*

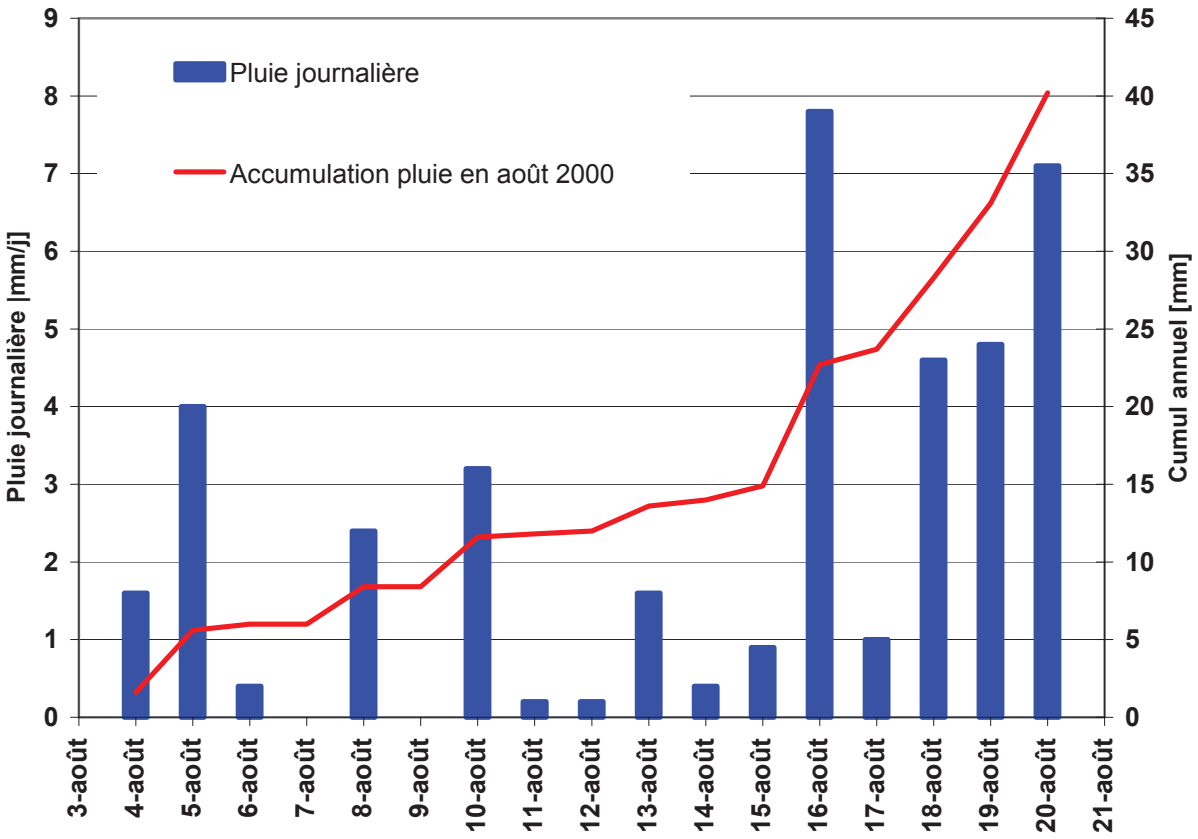


Figure 80 : *Pluviométrie : journalière et cumulée en mm (août 2000)*

Parmi toutes les analyses initialement prévues, les BTEX dans l'air de la zone non saturée, l'humidité du sol ou la pression atmosphérique n'ont pu être intégrées en raison d'un mauvais choix de l'analyseur.

Les appareils inadaptés sont :

- le PID Foxboro : PID portable de qualité destiné à des mesures ponctuelles mais inadapté à un fonctionnement en continu ;
- le baromètre prévu pour fonctionner avec un boîtier d'acquisition spécifique non fourni. Ce dernier d'une excellente précision n'était hélas pas compatible avec la centrale d'acquisition. Un baromètre plus simple, de précision acceptable et équipé d'une sortie analogique aurait été préférable ;
- Le capteur d'humidité dans le sol de type TDR : celui-ci nécessite une alimentation pilotée que l'automate, saturé par les automatismes, de pouvait offrir. De plus, l'intérêt d'une telle analyse est au niveau des points de prélèvement des gaz, dans le terrain naturel. Or l'éloignement des points de mesure par rapport au local d'analyse ne permettait pas une telle implantation (longueur de câble limitée à 10 m).

Au travers de cet exemple de suivi sur la période du 4 au 20 août 2000, l'importance du choix de la valeur à retenir, parmi la multitude de mesures effectivement réalisées, apparaît primordiale pour le suivi à long terme. Les règles à suivre doivent privilégier la représentativité de la valeur et permettre une reproductibilité quotidienne. Les enregistrements massifs des données selon des pas de temps de 2 minutes (fluorescence) ou 10 minutes (autres analyses) montrent ici tout leur intérêt pour valider les valeurs à retenir. En effet l'étude de l'évolution globale des analyses à l'échelle de la journée (Figure 72 et Figure 73) renseigne immédiatement sur le bon ou mauvais fonctionnement du processus (automatisme, analyseurs, colmatage, etc…). Lorsqu'une anomalie est détectée les analyses journalières peuvent ne pas être retenue avec éventuellement la programmation d'une intervention de maintenance sur site.

Les analyses présentées apparaissent stables sur la période (biogaz, pluie, températures, humidité air) à l'exception de la fluorescence des eaux. Ce dernier paramètre montre une atténuation du signal non réaliste avec une réelle évolution des concentrations. En effet, on observe pour les trois piézomètres une diminution de la fluorescence de même nature alors que rien ne laisse à penser qu'ils doivent évoluer dans le même sens. L'origine de cette diminution de fluorescence peut provenir de l'analyseur lui-même, ce qui nécessite donc des investigations plus précises pour caractériser cette dérive de la mesure.

III.3. Dysfonctionnements provoqués et influence sur la fluorescence UV

III.3.1. Période sans maintenance

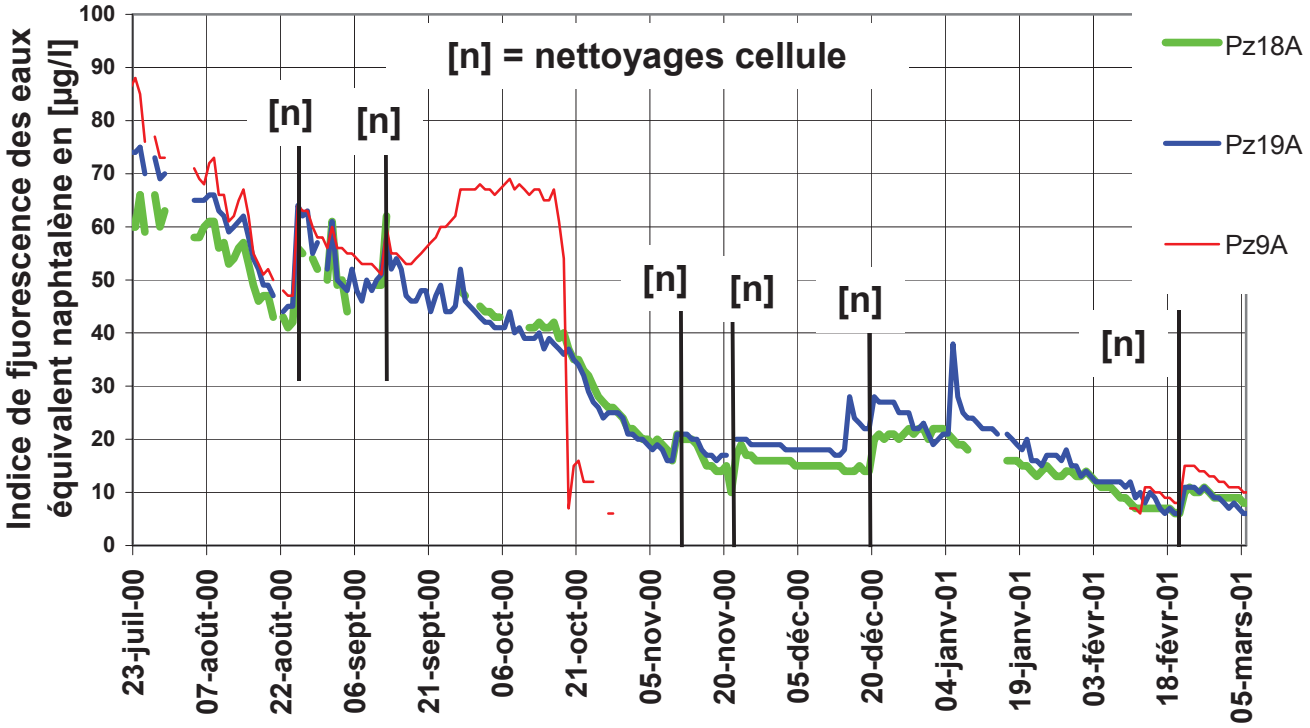


Figure 81 : *Evolution de la fluorescence brute des eaux sans maintenance (sauf nettoyage) et influence d'un simple nettoyage de la cellule*

L'observation globale de la fluorescence UV sur une période sans maintenance hormis le simple nettoyage de la cellule montre une baisse constante régulière du signal sur tous les piézomètres échantillonnés. Le déphasage observé au Pz9A en octobre 2000 ne peut être pris en compte en raison du mauvais fonctionnement de la pompe qui cessa définitivement de fonctionner fin octobre 2000, pour une remise en service en février 2001 (problèmes de connexions électriques). A cette date le signal mesuré au Pz9A est en phase avec les autres piézomètres ce qui laisse à penser que sans l'arrêt de cette pompe, l'évolution des 3 mesures de fluorescence aurait été similaire : une baisse constante et régulière du signal.

Pour connaître la réelle évolution de la fluorescence des eaux prélevées de la nappe, il est donc nécessaire de s'affranchir des erreurs liées aux conditions d'analyse. Une recherche sélective des causes possibles de ces dérives (atténuation du signal) doit être conduite en identifiant et, si possible, en isolant chaque paramètre influent.

III.3.2. Influence d'un simple nettoyage de la cellule

Le nettoyage simple consiste à passer un tourillon imbibé d'eau savonneuse sans démontage de la cellule donc sans contrôle de son efficacité sur l'opacité des parois de la cellule en verre. On remarque sur la Figure 81 que ces interventions ont une influence limitée sur la mesure. Une légère augmentation du signal est bien observée mais n'apporte pas de réelle modification des résultats. Toutefois, le premier nettoyage effectué en août a eu un impact plus important que les autres interventions, sûrement en raison de la turbidité importante des premières eaux pompées. Ensuite, avec le temps et la répétition des pompages, les eaux sont devenues moins chargées suite au lessivage des particules fines autour des crépines de prélèvement.

Indiscutablement, le nettoyage de la cellule est indispensable afin d'éviter son encrassement total sous l'influence prolongée du passage des eaux brutes. Cette intervention de maintenance doit se pratiquer de façon régulière.

III.3.3. Etude d'un arrêt prolongé du système

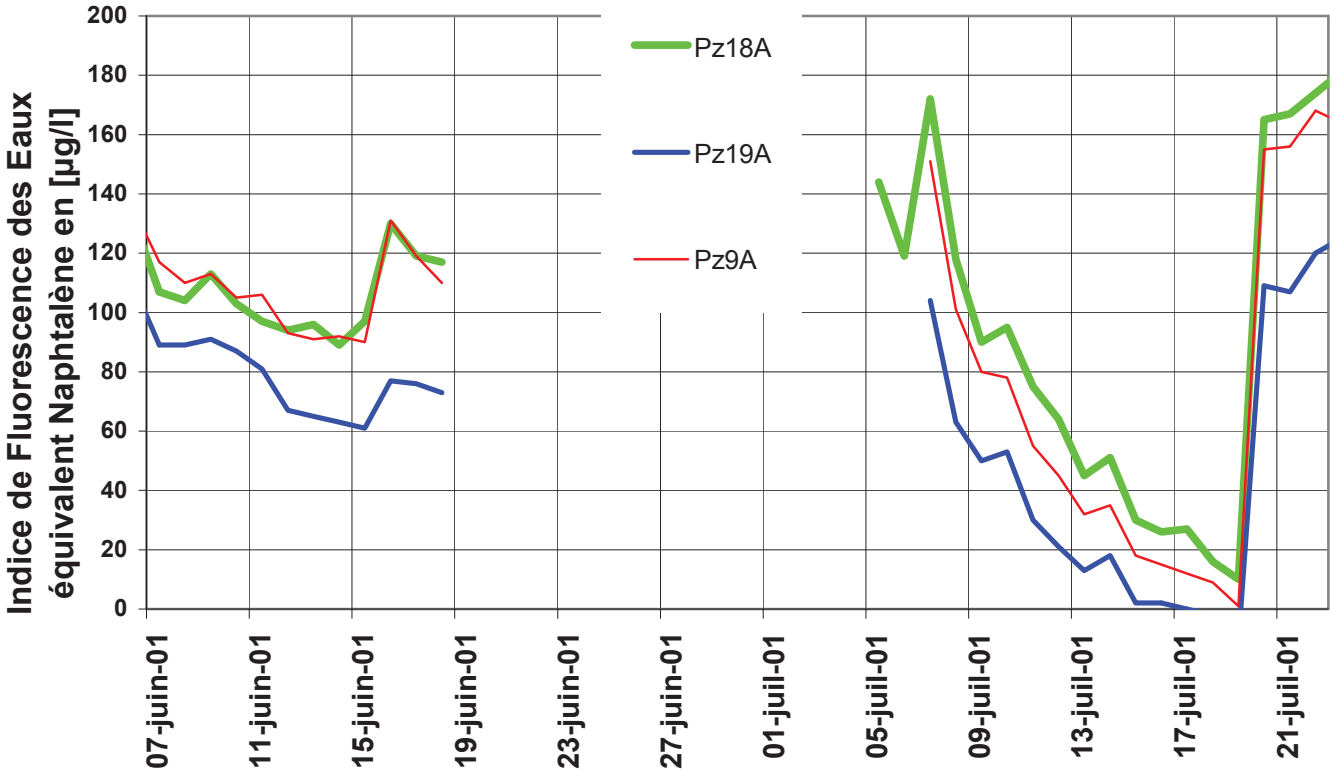


Figure 82 : *Evolution fluorescence brute UV des eaux après un arrêt longue durée (17 jours environ)*

En juin 2001, une anomalie sur le dispositif d'alarme a engendré une coupure prolongée de l'alimentation électrique et donc l'arrêt complet du système pendant plus d'une quinzaine de jours.

Le système a été remis en service le 4 juillet 2001 sans précaution particulière, donc sans purge. On remarque dans les analyses qui ont suivi une décroissance très rapide du signal, caractéristique d'un fort encrassement de la cellule. Cette conséquence est à rapprocher de la mise en service initiale du système avec les premières eaux de pompages forcément plus chargées en fines. Le pompage quotidien, régulier avait instauré un équilibre de fonctionnement qui a été rompu par l'arrêt prolongé. Ce dernier a permis une décantation des matières en suspension qui ont massivement été mobilisées lors du redémarrage des pompes.

Un tel système avec une mesure optique est donc sensible à la "propreté" de l'eau. Avec des périodes d'arrêt des pompages ayant pour conséquence une remobilisation anarchique des fines au redémarrage, on remarque une vitesse d'encrassement de la cellule incompatible avec une mesure de qualité. Un suivi en continu à l'aide de la fluorescence UV demande impérativement un fonctionnement régulier.

III.3.4. Impact d'une modification de débit

La modification de débit n'a pas été étudiée en tant que telle. En effet, les essais préliminaires sur site ont montré que le débit n'avait guère d'influence sur l'analyse à condition de rester dans la fourchette de 200 à 300 l/h. L'objectif était donc de respecter ces consignes mais la technologie employée, avec des vannes de bridage sans asservissement des pompes, n'a pas permis de garantir un débit constant. En effet, le contrôle du débit par bridage fonctionne si les pertes de charges sont constantes ce qui n'était pas le cas suite au colmatage progressif des filtres. Initialement, ces derniers avaient été installés, à juste titre, pour se prémunir d'un endommagement rapide de la cellule par des particules abrasives. L'excès de matière en suspension évoqué au paragraphe précédent a eu pour conséquence de saturer les membranes filtrantes et donc d'induire une résistance à l'écoulement d'où une réduction progressive du débit. Les observations faites sur site à chaque nettoyage de la cellule ont montré que les débits descendaient parfois sous les 50l/h après 15 jours de fonctionnement et moins en cas d'excès de matières en suspension.

Les très faibles débits sont particulièrement néfastes pour la qualité de la mesure car ils favorisent l'échauffement de l'échantillon sous la lampe UV dans la cellule et un encrassement accéléré en raison des faibles vitesses, voire une stagnation de l'eau.

Si une diminution modérée de débit jusqu'à 100l/h n'a pas de réelle incidence sur la mesure, c'est surtout les très faibles vitesses d'écoulement résultant du colmatage parfois important des filtres qui sont préjudiciables. Un asservissement des pompes en fonction du débit aurait permis de maintenir un débit constant par augmentation de la puissance en fonction des pertes de charges.

III.3.5. Etude d'une modification technique sur l'appareil.

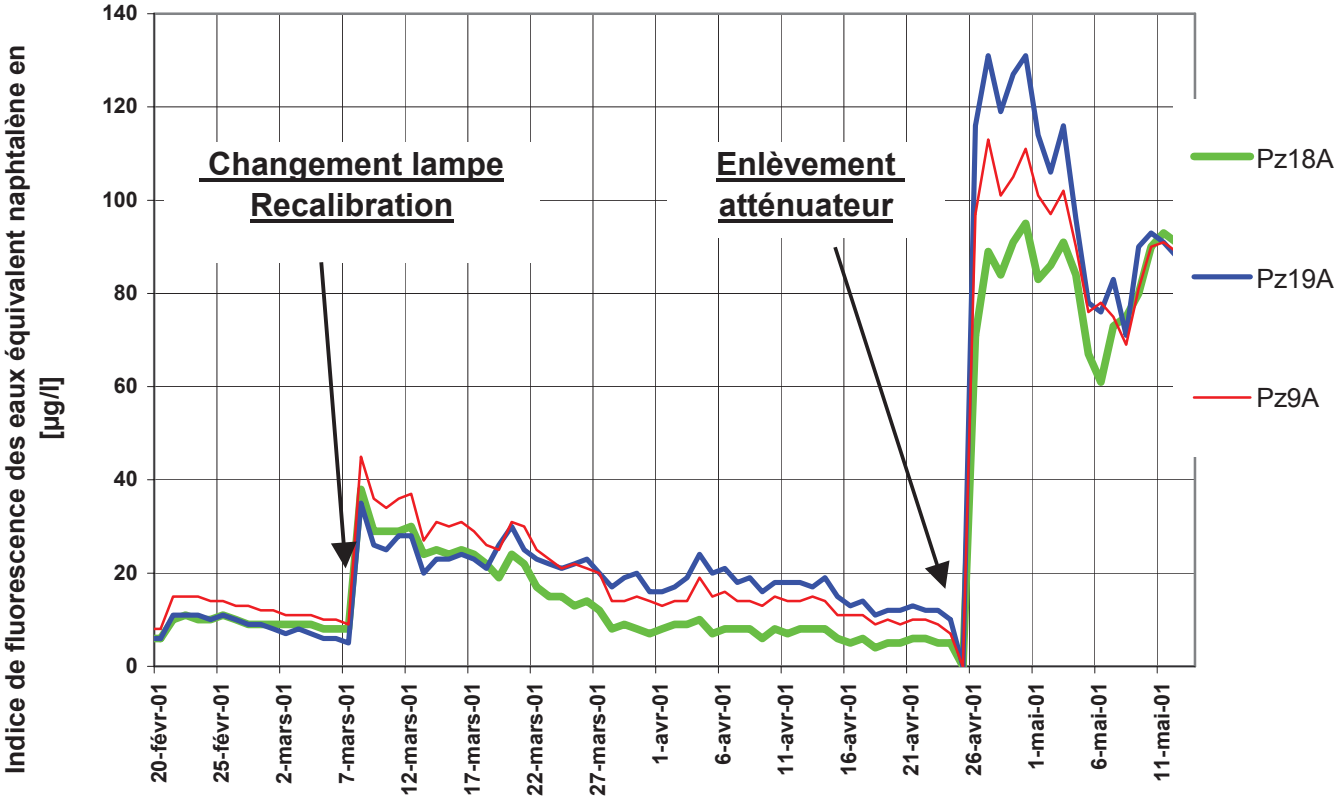


Figure 83 : *Evolution de la fluorescence brute UV des eaux après une modification technique sur l'appareil*

Le fluorimètre UV Turner Designs utilisé pour l'instrumentation dans les conditions d'exploitation imposées par le Monitoring en Continu montre une diminution du signal. Les études des dysfonctionnements précédents prouvent que la mauvaise qualité des eaux brutes induit un encrassement de la cellule, responsable de la perte du signal. Il s'agit là de facteurs externes à l'appareil. Il faut maintenant se poser la question des facteurs internes, c'est à dire propres au fonctionnement de l'appareil, à son réglage. La technologie du fluorimètre UV induit-elle une dérive chronique qui viendrait s'ajouter aux agressions externes?

La Figure 83 montre sur la période du 20 février au 11 mai 2001 l'impact sur la mesure de modifications techniques de l'appareil. Sur cette période sans maintenance hormis quelques nettoyages, l'atténuation du signal est de mise. Le changement de lampe et la première recalibration du 7 mars 2001, après presque un an de fonctionnement, a pour conséquence une brusque augmentation du signal (la durée de vie de la lampe est de 8000 heures et une recalibration de l'appareil est obligatoire après cette intervention). De même l'enlèvement de l'atténuateur le 26 avril 2001 a engendré un relèvement logique du signal puisque l'intensité lumineuse d'émission n'est plus bridée (cette pièce située sur le filtre d'excitation atténue la lumière envoyée sur l'échantillon et divise donc la fluorescence mesurée par 4).

Ces événements montrent l'existence d'une dérive chronique de l'analyseur (altération de l'intensité de la source lumineuse et dérèglement général du fluorimètre) qui indique la nécessité d'une intervention régulière sur l'appareil pour remplacer les pièces d'usure (lampe, cellule) et d'une recalibration de l'appareil pour remettre l'analyseur dans son état d'origine et ainsi extraire une mesure en continu cohérente.

III.3.6. Conclusion sur le fonctionnement du Fluorimètre UV

Ces études de dysfonctionnements traduisent la difficulté d'analyser de l'eau brute sur site en continu. Un Monitoring continu avec un fluorimètre UV impose la prise en compte des facteurs perturbants qu'ils soient externes (encrassement du à l'agression des eaux brutes, colmatage) ou interne (altération de la lampe, de la cellule, dérèglement de l'appareil). La difficulté est de quantifier ces perturbations pour en extraire des données consolidées représentatives de l'évolution réelle du site.

Le travail consiste maintenant à élaborer puis à tester des prescriptions techniques de maintenance permettant de quantifier cette dérive globale de l'appareil en vue d'apporter une correction.

III.4. Traitement des données acquises

III.4.1. Elaboration d'une méthodologie de correction

L'objectif est de quantifier le comportement du fluorimètre dans le temps. Pour cela la méthodologie expérimentale retenue est, à partir d'un état d'origine de l'analyseur, de quantifier sa dérive sur des périodes croissantesde fonctionnement : 2 jours, 5 jours, 9 jours, 14 jours, 18 jours et enfin 22 jours. Cela nécessite une intervention de maintenance rigoureuse avant chaque remise en service pour que l'analyseur soit dans des conditions de fonctionnement identiques. L'évaluation des dérives se fera par comparaison des valeurs avant et après réinitialisation (nettoyage et recalibration). L'étude de ces dérives en fonction du temps doit nous renseigner sur le comportement du fluorimètre UV, les corrections à apporter aux analyses brutes et enfin nous permettre de définir une durée maximum de fonctionnement sans maintenance.

III.4.2. Expériences

Chaque recalibration du fluorimètre se fait avec un étalon composé uniquement de naphtalène dans une concentration similaire aux eaux à analyser. L'appareil fonctionne sans atténuateur sur l'échelle haute entre 100 et 300 µg/L équivalent naphtalène. Pour pouvoir comparer les résultats sur les différents pas de temps les interventions sur l'appareil devaient être rigoureusement identiques.

La procédure suivie est la suivante :

- préparation la veille de la calibration d'un étalon standard (250 µg/L de naphtalène) et des quatre étalons dilués :1/2, 1/4, 1/12 et 1/20. Ces derniers seront utilisés pour déterminer la dérive de chaque échelle de mesure (haute, moyenne et basse) de l'analyseur ;
- mesure eau brute avant calibration (acquisition de la veille).
- injection de l'étalon standard (environ 250µg/L) dans la cellule de l'analyseur et lecture de la mesure avant la calibration ;
- calibration de l'analyseur avec l'étalon standard ;
  - nettoyage à l'eau savonneuse + tourillon ;
  - faire le "0" avec l'eau permutée (10 secondes après fermeture de la cellule) ;
  - calibrer l'analyseur avec l'étalon standard d'environ 250 µg/L (1 minute après fermeture cellule) ;
- mesure : eau permutée pour vérification du "0" après calibration ;
- mesures de l'étalon standard (plus des quatre dilués) après la calibration ;
- mesure eau brute après calibration (acquisition du lendemain)
  La récupération des mesures de l'eau brute avant (acquisition de la veille) et après la calibration (acquisition du lendemain) sert à la détermination de la différence de valeurs d'analyse et ainsi en déduire l'influence générale de la manipulation sur les mesures ;
- puis répétition de ces étapes selon le programme établi (5 jours, 9 jours, 14 jours…).

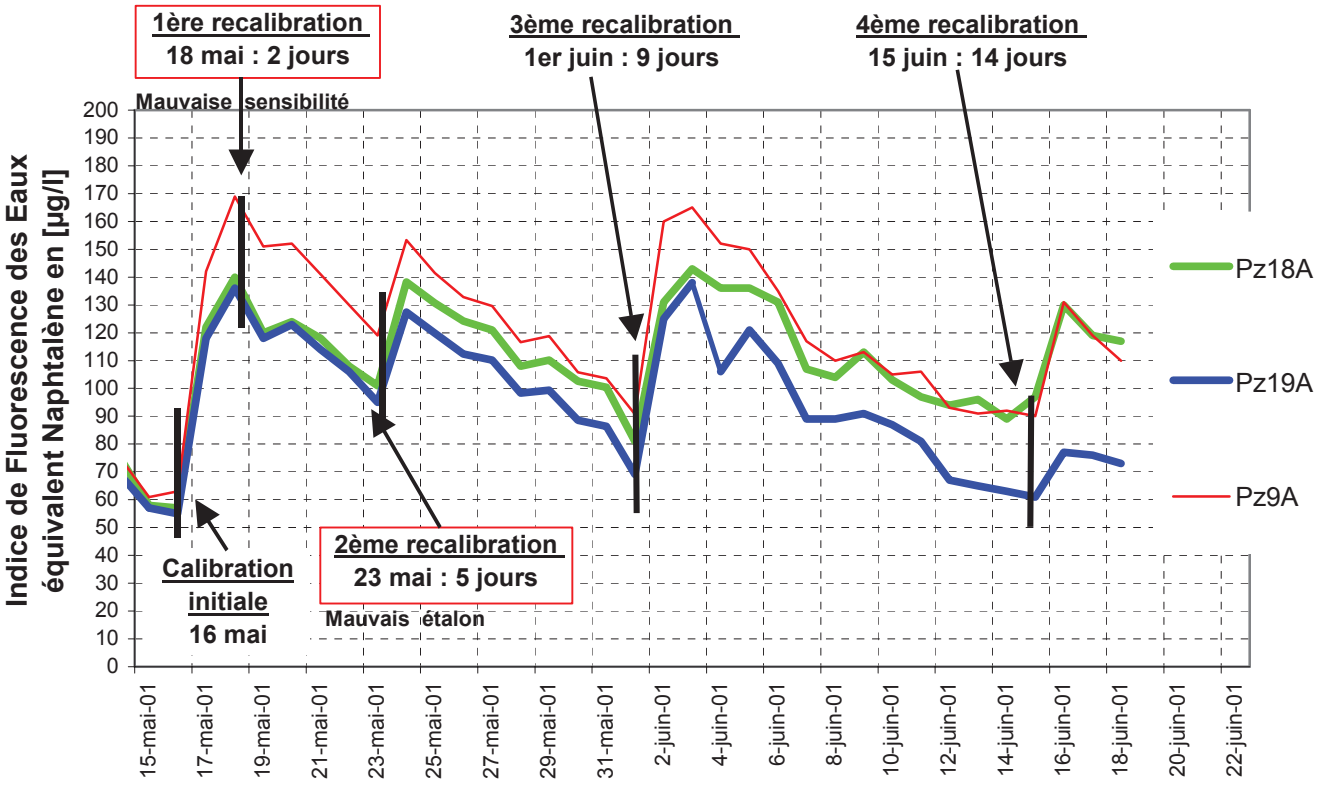


Figure 84 : *Campagne de recalibration de mai-juin 2001*

La campagne de recalibration a débuté le 16 mai 2001 (Figure 84) après une calibration initiale. Les recalibrations suivantes se sont ensuite enchaînées :

- 1ère recalibration à 2 jours (18 mai 2001) *avec une erreur de réglage de la sensibilité de l'appareil ;*
- 2ème recalibration à 5 jours (23 mai 2001) *avec une erreur d'étalon 250µg/L annoncé pour 270µg/L réel ;*
- 3ème recalibration à 9 jours (1er juin 2001)
- 4ème recalibration à 14 jours (15 juin 2001)

Malheureusement des ennuis techniques (coupure d'alimentation électrique suite à un orage ayant endommagé l'alarme) ont perturbé l'expérience à partir du 30 juin 2001. Un dysfonctionnement de l'alarme a engendré une coupure de l'alimentation électrique, puis indirectement la perte des enregistrements du 18 juin au 4 juillet 2001 suite à une erreur de manipulation dans la réinitialisation de la centrale d'acquisition/automate. De plus, au redémarrage de l'installation aucune précaution n'a été prise pour purger les conduites et les particules fines des piézomètres. Le système s'est donc rapidement colmaté comme décrit précédemment dans l'étude d'un arrêt prolongé.

Il n'a donc pas été possible de poursuivre l'expérience plus longtemps, la 5ème recalibration à 18 jours ainsi que la 6ème recalibration à 22 jours ont été abandonnées.

En ce qui concerne l'erreur de réglage de sensibilité de l'appareil du 18 mai 2001 qui a engendré une recalibration avec atténuation du signal, aucune conclusion de pourra être déduite de ce pas de temps de 2 jour. Pour l'erreur d'étalon du 23 mai 2001, l'appareil a été calibré pour un standard de 250µg/L alors que l'étalon faisait en réalité 270µg/L. Pour atténuer ce mauvais réglage, il a été décidé d'appliquer une correction linéaire de 270/250=1,08 à toutes les valeurs de fluorescence relevées entre le 24 mai et 1er juin 2001 (valeurs soulignées dans l'Annexe 20). Cette correction s'applique également à cette expérimentation.

Toutefois et avant d'envisager la poursuite de ces essais, dont la méthodologie semble bonne, il est intéressant de comparer l'évolution de l'indice de fluorescence, mesurée en continu, avec l'évolution réelle des concentrations en naphtalène. L'Annexe 16, donne les concentrations en naphtalène d'échantillons d'eau prélevés dans les piézomètres instrumentés (Pz9A, Pz18A et Pz19A) et analysés par HPLC-UV. Les concentrations en naphtalène sont très faibles (entre 0,01 et 0,05 µg/L), soit proches de la limite de détection et sans commune mesure avec l'indice de fluorescence (entre 30 et 100 µg/L en juillet). Il apparaît donc particulièrement difficile d'établir un lien entre les deux types analyses d'autant plus qu'il y a effectivement très peu de naphtalène.

Les eaux ne sont pas assez polluées et les composés qui fluorescent ne sont pas nécessairement du naphtalène (BTEX, produits issus de la biodégradation, etc…). Persister dans l'adaptabilité du fluorimètre UV pour la mesure du naphtalène semble stérile.

III.4.3. Résultats des expériences

Le Tableau 12 regroupe les résultats ainsi obtenus :

Tableau 12 : *Les résultats de la méthodologie de correction*
(à noter l'erreur d'étalon du 23 mai : correctif appliqué 270/250=1,08)

Dates (année 2001)																		
		Références					Avant calibration				Après calibration							
							Eau Brute				Eau brute							
Temps en jours entre deux calibrations		Etalon standard	Etalon dilué 1	Etalon dilué 2	Etalon dilué 3	Etalon dilué 4	Pz18A	Pz19A	Pz9A	Etalon Standard	Pz18A	Pz19A	Pz9A	Etalon Standard	Etalon dilué 1	Etalon dilué 2	Etalon dilué 3	Etalon dilué 4
16 mai	**0**	**242**	121	61	24	12												
18 mai	**2**	**242**	121	61	24	12	140	136	169	**252**	120	118	151	**239**	120	52	14,6	2,8
23 mai corrigé	**5**	**270**	125	62	25	12,5	101	95	119	**227**	128 (138 réel)	118 (127 réel)	142 (153 réel)	**250 270 (réel)**	126 (136 réel)	65 (70 réel)	25 (27 réel)	13.4 (14 réel)
1er juin corrigé	**9**	**274**	137	68.5	27,4	13,7	75 (81 réel)	64 (69 réel)	84 (91 réel)	**119 (129 réel)**	131	125	160	**274**	140	67	26.7	13.5
15 juin	**14**	**253**	126.5	63	25,3	12,7	97	61	90	**137**	117	73	131	**253**	126	54	18	6
4 juillet	*20*	*236*	*118*	*59*	*23,6*	*11,8*	Perte données			*107*	*144*	*94*	*152*	*236*	*127*	*67*	*28*	*17.5*
6 juillet	*2*	*228*	*114*	*57*	*22,8*	*11,4*	*119*			*162*	*172*	*104*	*151*	*230*	*116*	*58*	*23*	*11*
19 juillet	*13*	*240*	*120*	*50*	*21*		Colmatage			*31*	*165*	*109*	*155*	*240*	*115*	*47*	*11*	

Suite aux dysfonctionnements, les manipulations postérieures au 15 juin 2001 (*en italique souligné* dans le Tableau 12) sont inexploitables. Pour le reste, il a été pris pour hypothèse que les valeurs d'avant et d'après la calibration pour chaque piézomètre et l'étalon standard sont identiques (peu de variation sur une journée en raison de la faible variabilité des phénomènes dans le sol). Ainsi, il a été calculé les pourcentages d'erreur pour les trois piézomètres et pour l'étalon standard (Tableau 13).

Tableau 13 : *Les pourcentages d'erreur d'eaux brutes et de l'étalon standard*

Date (2001)	Pas de temps [jours]	Pz18A				Pz19A				Pz9A				Etalon standard				
		avant calibration (a)	après calibration (b)	(c) = (b) - (a)	% = (c) / (a)	avant calibration (d)	après calibration (e)	(f) = (e) - (d)	% = (f) / (d)	avant calibration (g)	après calibration (h)	(i) = (h) - (g)	% = (i) / (g)	concentration étalon (k)	avant calibration (l)	après calibration (m)	(n) = (l) - (k)	% = (n) / (k)
18 mai	2	140	120	-20	-14%	136	118	-18	-13%	169	151	-18	-11%	242	252	239	-10	-4%
23 mai	5	101	138	37	37%	95	137	42	44%	119	153	34	29%	270	227	270	43	16%
1er juin	9	81	131	50	62%	69	125	56	81%	91	160	69	76%	274	129	274	145	53%
15 juin	14	97	130	33	34%	61	77	16	26%	90	131	41	46%	253	137	253	116	46%

Les courbes d'erreur ainsi obtenues pour chaque piézomètre (Pz18A, Pz19A et Pz9A) ainsi que pour l'étalon standard de référence sont représentées sur la Figure 85.

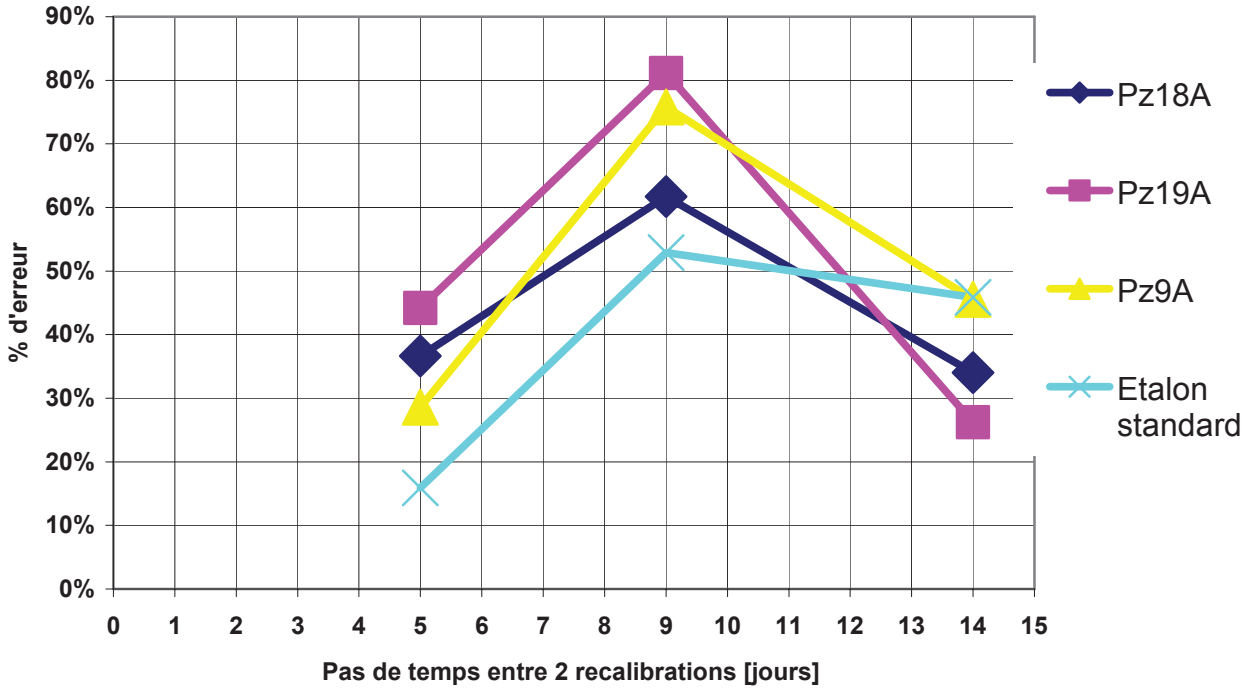


Figure 85 : *Pourcentage d'erreur du Fluorimètre UV après chaque calibration*

On rappelle que 2 erreurs de recalibration se sont produites :

- à 2 jours avec une mauvaise sensibilité : on remarque effectivement une erreur négative, soit une augmentation du signal tout à fait improbable. Ces données ne seront pas prises en compte.
- à 9 jours avec une calibration faite sur 250 µg/L alors que l'étalon utilisé était de 270 µg/L. Une correction de 1,08 a été appliquée sur toutes les analyses entre 23 mai et le 1er juin 2001 pour contenir cette dérive. Cette démarche semble acceptable au regard des dérives observées qui atteignent rapidement plus de 50 %.

III.4.4. Bilan des expériences conduites

La lecture des courbes de la Figure 85 montre qu'effectivement le Fluorimètre UV atteint rapidement plus de 50 % de dérive. Si cette dernière observée à 9 jours (50-80 %) semble plus importante que celle observée à 5 et à14 jours (30-50 %), il n'est pas possible d'en déduire une conclusion faute de répétition des manipulations. De plus, trop de facteurs interviennent comme l'état de l'analyseur, sa vétusté, les conditions d'exploitation, la fiabilité des interventions de maintenance (2 erreurs dans notre cas), etc… Néanmoins la démarche suivie semble adaptée, elle aurait normalement dû se poursuivre par d'autres essais comprenant des pas de temps supérieurs à 14 jours et le tout répété plusieurs fois afin d'en extraire une loi d'atténuation du signal en fonction du temps écoulé depuis la dernière calibration.

Ces essais donnent une indication sur l'intervalle optimum entre 2 maintenances. Toutefois, le reste du dispositif, et notamment les vannes pointeaux de réglage de débit sujettes à colmatage ainsi que les réserves en eau distillée, ne supporte pas des maintenances espacées de plus de 15 jours. C'est donc cette durée qui sera choisie pour la recalibration du fluorimètre. Cette fréquence satisfait également l'aspect pratique lié à la fréquence des déplacements pour interventions sur le terrain.

Au regard de l'importance des dérives du Fluorimètre UV, il apparaît évident que cette méthode d'analyse n'est pas vraiment adaptée à un suivi quantitatif en continu des HAP dans une eau de nappe polluée. Il faut admettre que les résultats de fluorescence n'apporteront qu'une indication qualitative et les investigations pour affiner les analyses de fluorescence UV ne seront pas poursuivies.

De ces essais, nous ne pouvons que confirmer la difficulté de mesurer du naphtalène en continu dans des eaux brutes. Indiscutablement, le matériel installé n'est pas adapté pour une analyse de ce type et les efforts nécessaires pour le faire fonctionner du mieux possible sont incompatibles avec une acquisition automatique. L'intérêt de la fluorescence UV pour l'analyse du naphtalène dans les nappes montre là ses limites : nécessité de déplacer régulièrement un opérateur sur site pour maintenance, celui-ci pourrait tout aussi bien prélever un échantillon dans chaque piézomètre pour analyse HPLC-UV en laboratoire.

Il est sûrement possible d'améliorer le système en reconduisant les essais avec plus de rigueur mais pour quels résultats? Il serait opportun de statuer sur une méthode de correction simple pour un résultat qui, semble-t-il, ne dépasse pas le stade du qualitatif : mesure d'un indice de fluorescence dans des eaux très peu chargées en naphtalène (< 0,02 µg/L). Une complexification du traitement introduirait encore plus d'erreur. Avec les faibles vitesses d'évolution dans les eaux d'une nappe (une dizaine de centimètres par jour), un relevé tous les 15 jours semble satisfaisant pour un suivi à long terme sur plusieurs années.

Toutefois, il s'agit là du dernier élément de la chaîne qui ne remet nullement en cause le dispositif. Au contraire, la plate-forme offerte ici est le lieu idéal pour tester d'autres technologies, perspective qui semble être plus profitable que de tenter de persévérer avec un analyseur peu adapté.

III.4.4.1. Méthode de correction de données

Au regard du bilan des expériences et de l'arrêt des investigations pour l'établissement d'une loi de correction, il a été retenu la solution d'une correction linéaire des données entre chaque recalibration. Cette dernière est construite sur 2 hypothèses :

1. Les analyses les plus fiables sont celles qui suivent les recalibrations : analyses du lendemain ;
2. L'évolution des eaux sur une journée est négligeable ce qui permet d'admettre qu'il y a égalité entre les valeurs d'avant et d'après la calibration.

Avec une telle dérive (plus de 100 % de variation) des données brutes, une méthode de correction rigoureuse ne peut se justifier. La correction linéaire à posteriori semble la moins fausse tout en restant simple. Un exemple de correction est présenté sur le Tableau 14 et graphiquement sur la Figure 86. La courbe corrigée ainsi obtenue représentera l'évolution de fluorescence en (µg/L) équivalent HAP brute et corrigée pour la période de 17 mai 2001 à 16 juin 2001.

Tableau 14 : *Exemple de correction linéaire de flurescence UV entre le 15 mai et le 18 juin 2001 à noter l'égalité de la fluorescence corrigée entre le jour et le lendemain de la calibration*

Dates	Pz18A		Pz19A		Pz9A		Remarques
	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	
15-mai-01	58		57		61		
16-mai-01	57		55		63		Calibration
17-mai-01	122	122	118	118	142	142	
18-mai-01	140	120	136	118	169	151	Calibration
19-mai-01	120	120	118	118	151	151	
20-mai-01	124	133	123	131	152	161	
21-mai-01	118	137	114	130	141	158	
22-mai-01	108	136	106	130	130	156	
23-mai-01	101	138	95	127	119	153	Calibration
24-mai-01	138	138	127	127	153	153	Correction x 1,08
25-mai-01	131	137	120	127	141	150	
26-mai-01	124	137	112	126	133	150	
27-mai-01	121	140	110	131	130	156	
28-mai-01	108	133	98	126	117	151	
29-mai-01	110	141	99	134	119	162	
30-mai-01	103	140	89	130	106	158	
31-mai-01	100	144	86	135	104	164	
01-juin-01	81	131	69	125	91	160	Calibration
02-juin-01	131	131	125	125	160	160	
03-juin-01	143	146	138	139	165	168	
04-juin-01	136	141	106	108	152	158	
05-juin-01	136	144	121	125	150	159	
06-juin-01	131	141	109	114	135	148	
07-juin-01	107	120	89	95	117	133	
08-juin-01	104	119	89	96	110	129	
09-juin-01	113	131	91	100	113	135	
10-juin-01	103	123	87	97	105	130	
11-juin-01	97	120	81	92	106	134	
12-juin-01	94	119	67	79	93	125	
13-juin-01	96	124	65	79	91	126	
14-juin-01	89	119	63	78	92	130	
15-juin-01	97	130	61	77	90	131	Calibration
16-juin-01	130	130	77	77	131	131	
17-juin-01	119		76		119		
18-juin-01	117		73		110		

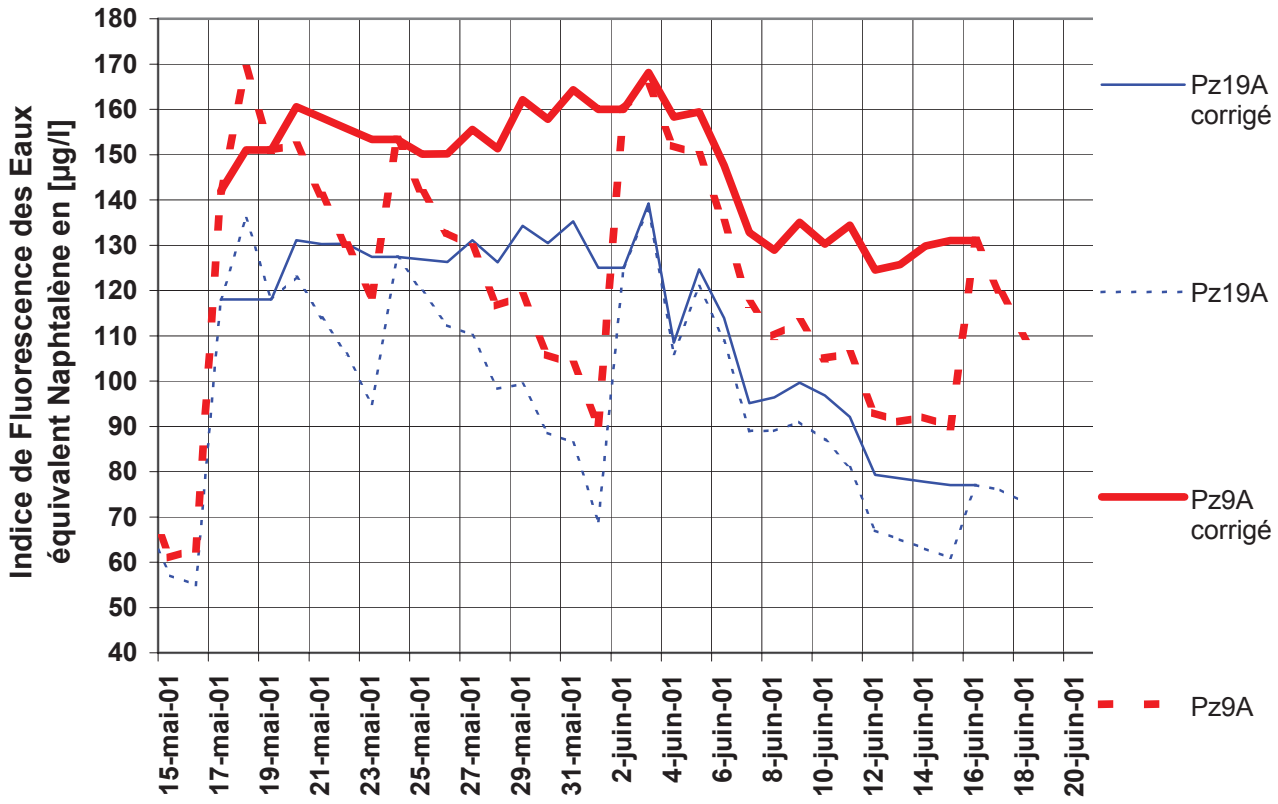


Figure 86 : *Evolution de l'indice de fluorescence brute et corrigé linéairement à posteriori*

III.4.5. Conclusion/ Discussion

C'est à partir du 16 mai 2001 que les données pourront être consolidées et ainsi permettre le suivi de l'évolution de la pollution dans l'eau aux 3 points de mesures.

Les recalibrations régulièrement effectuées sur cette période (depuis mai 2001 jusqu'à décembre 2001) avec une solution de concentration connue en naphtalène permettent d'apprécier la dérive de l'analyseur sur la période de fonctionnement et ainsi de recalculer, en post traitement, des valeurs consolidées plus représentatives du fonctionnement réel. Les courbes ainsi corrigées sont présentées sur la Figure 87. Les données du mois d'août n'ont pu être corrigées en raison d'une période sans maintenance d'un mois trop longue; l'appareil devant être recalibré tous les 15 jours afin de pouvoir exploiter les résultats obtenus.

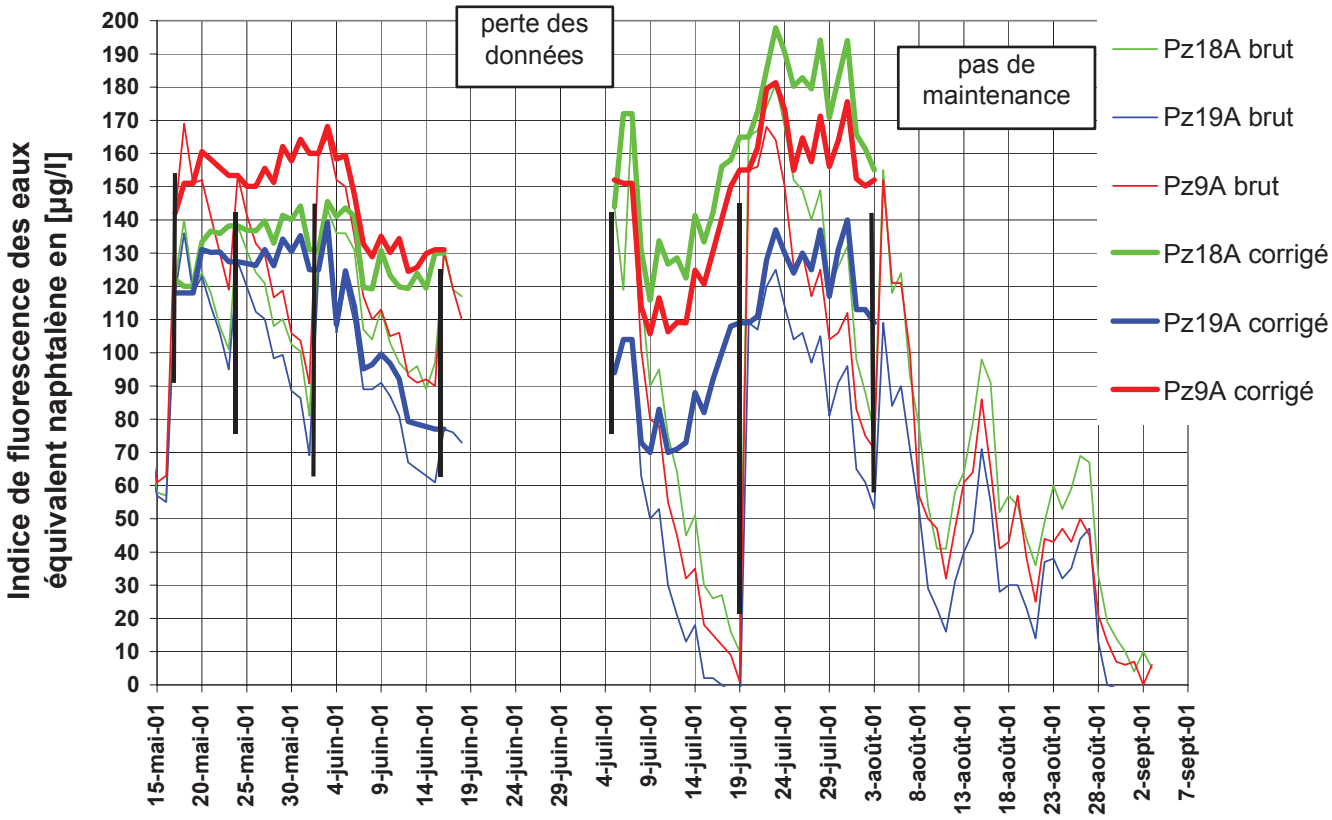


Figure 87 : *Evolution de la fluorescence corrigée des eaux suivant les opérations de maintenance*

Ces données corrigées couvrent moins d'un an de suivi ce qui n'est pas suffisant (à comparer aux données piézométriques) pour émettre de conclusions sur le fonctionnement du site compte tenu de son fonctionnement cyclique. D'autre part, il est apparu que les pompages, d'environ 1m^3 par jour et par piézomètre, répétés aux trois points de mesure ont perturbé l'équilibre "naturel" en essorant les sols autour des crépines. La durée de cette phase de pompage avait été choisie afin d'assurer une purge de trois fois le volume du piézomètre, purge préconisée par les normes *[LECOMTE, 1995]* pour l'échantillonnage d'eaux polluées par des HAP. Dans notre cas, les pompages ont lieu tous les jours, cette phase de régénération des eaux des piézomètres effectuée à débit maximum n'est donc pas nécessaire et a été réduite en mai 2001 de 1h à 10 minutes qui correspond au temps minimum nécessaire à la purge des conduites.

III.5. Evolution des teneurs en biogaz

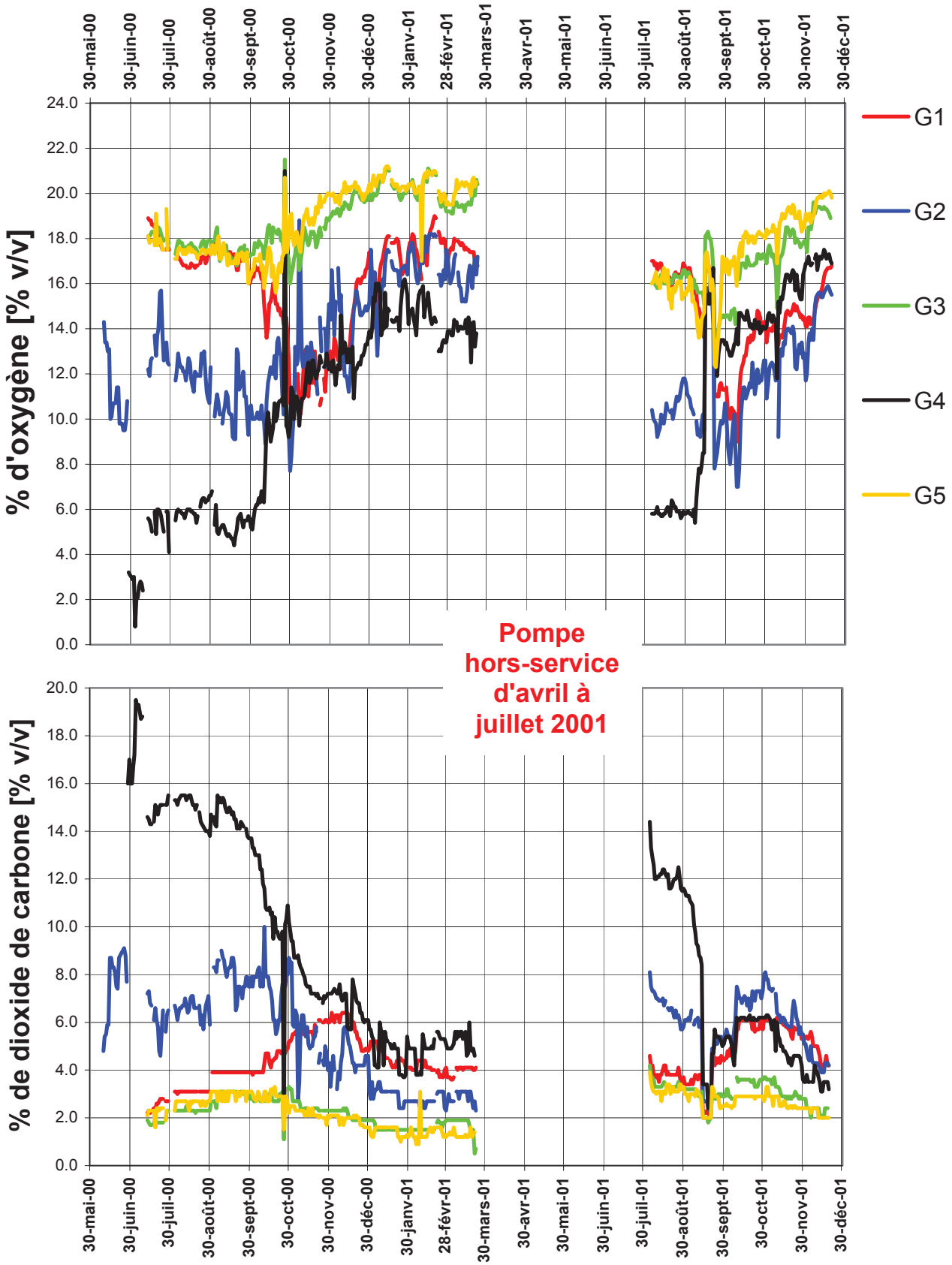


Figure 88 : *Suivi des concentrations en dioxyde de carbone et oxygène en G1, G2, G3, G4, G5*

La Figure 88 montre l'évolution des concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone dans la zone non saturée du sol aux points G1, G2, G3, G4 et G5. On n'observe pas de dégagement de méthane. Le système d'analyse de gaz a été arrêté en avril 2001 en raison d'une défaillance de l'appareil de mesure et de la pompe d'aspiration pour ne reprendre qu'en août 2001. On observe une concentration en dioxyde de carbone qui diminue parallèlement à une concentration en oxygène qui augmente. Les points présentant le plus fort dégagement de CO_2 sont G4 puis G2. Pour les trois autres, G1, G3 et G5, on observe des dégagements similaires plus faibles.

Les observations montrent une diminution de l'activité de biodégradation (augmentation de O_2 et diminution de CO_2) durant l'hiver 2000 malgré quelques ennuis techniques avec une possible altération progressive de la pompe dès octobre 2000 (fuites à l'admission dues à la détérioration de la membrane du corps de pompe). La reprise des analyses avec du matériel parfaitement reconfiguré s'est faite en août 2001 avec des valeurs qui confirment celles de l'année précédente à la même époque (automne 2000) : consommation d'oxygène et présence de CO_2 en période chaude.

On remarque, sur les Figure 89 à Figure 93, que la somme de O_2 et de CO_2 donne une valeur assez stable de l'ordre de 20% quel que soit le point ou la période. Cela indique en effet, d'une part, qu'il n'y a pas de fuite de biogaz et, d'autre part, que la stœchiométrie : $C + O_2 \rightarrow CO_2$ est conservée. D'un paramètre, il semble alors possible de déduire l'autre, aspect particulièrement intéressant pour un MCSP.

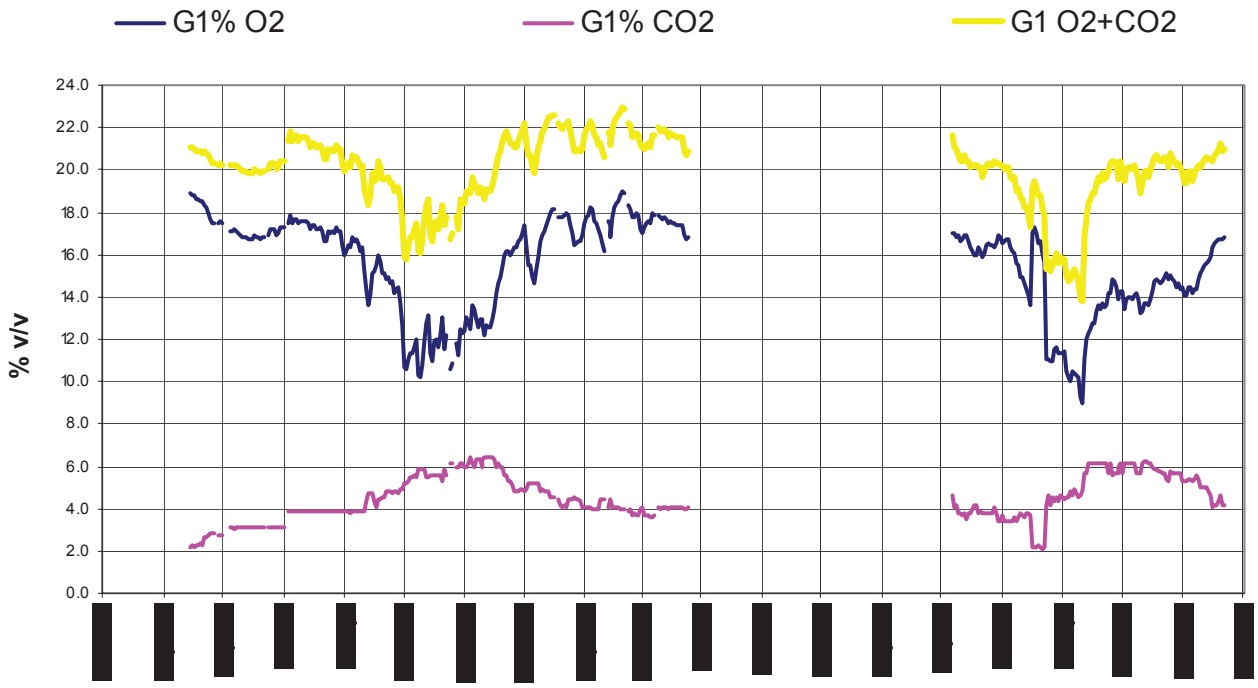


Figure 89 : *G1 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux*

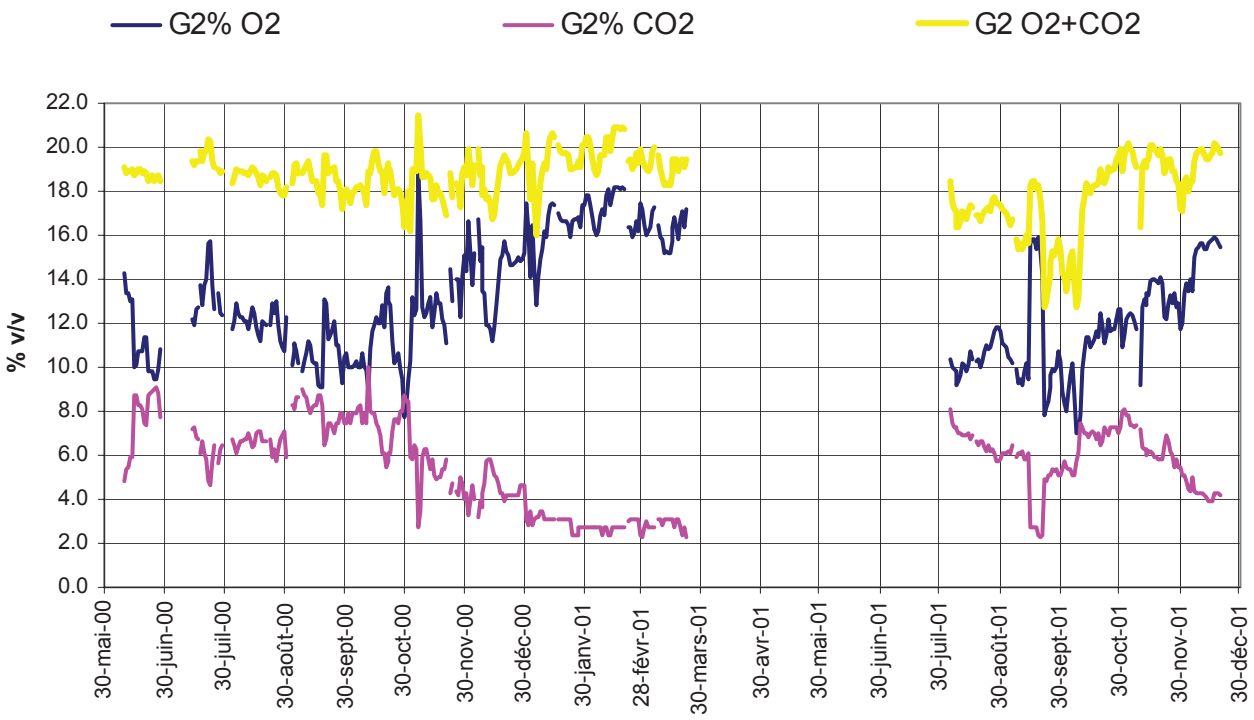


Figure 90 : *G2 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux*

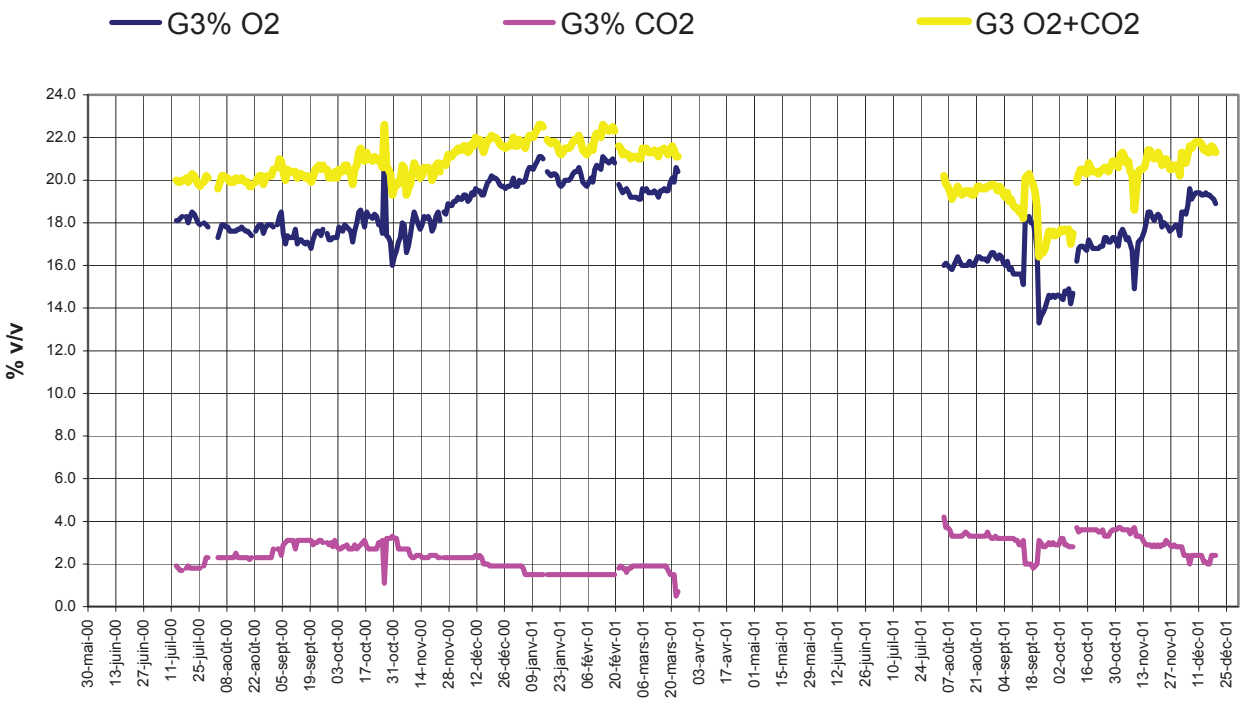


Figure 91 : *G3 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux*

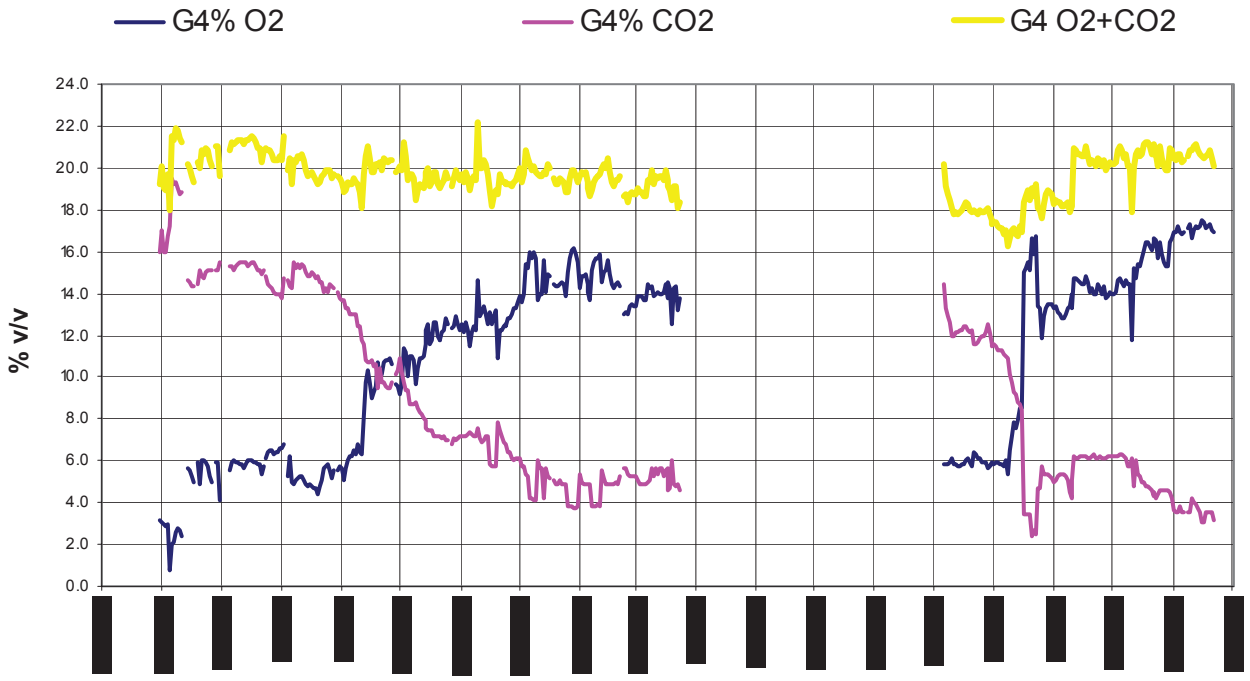


Figure 92 : *G4 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux*

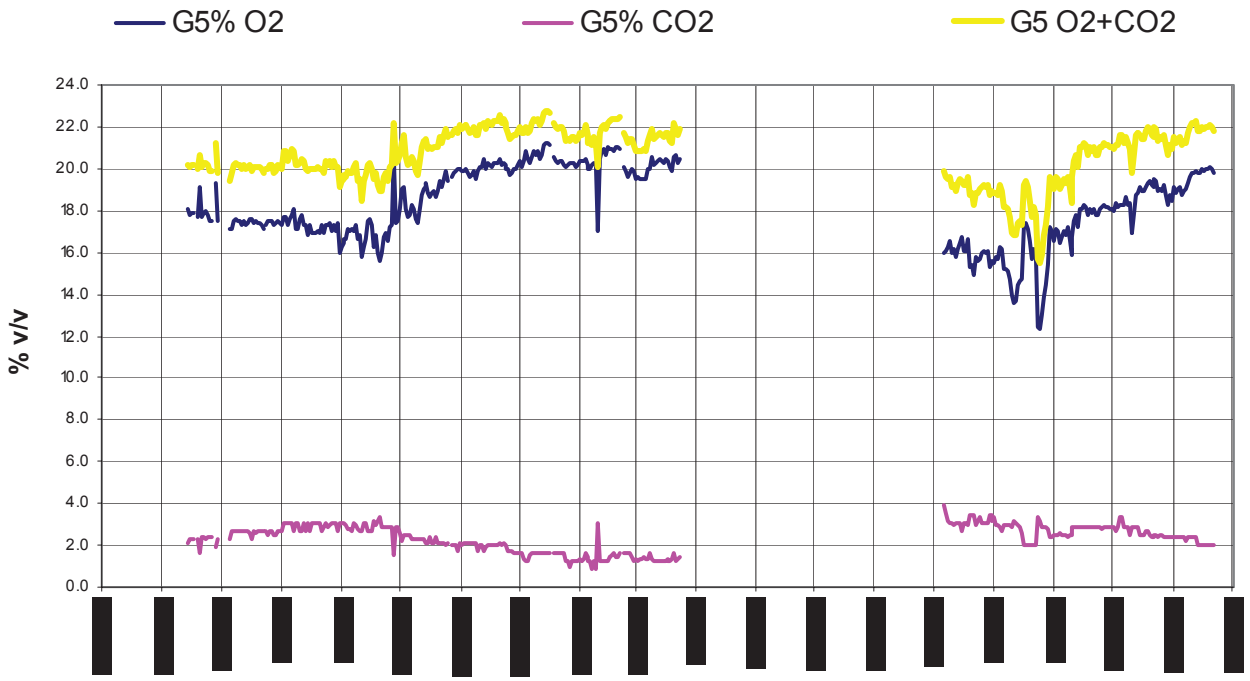


Figure 93 : *G5 concentrations en oxygène, dioxyde de carbone et somme des deux*

La Figure 94 met en évidence la corrélation entre la température et les dégagements de biogaz donc de l'activité de biodégradation naturelle des polluants du sol : l'activité de biodégradation est active (consommation d'oxygène et dégagement de dioxyde de carbone) en période chaude et ralentie en période froide.

Une étude plus approfondie de la Figure 94 montre que chaque évènement sur la température entraîne un autre évènement sur le CO_2 décalé de 3 jours environ. Ceci s'explique par les caractéristiques thermiques de l'épaisseur de sol entre les cannes de prélèvement et la surface du terrain naturel : inertie thermique et pouvoir isolant du sol.

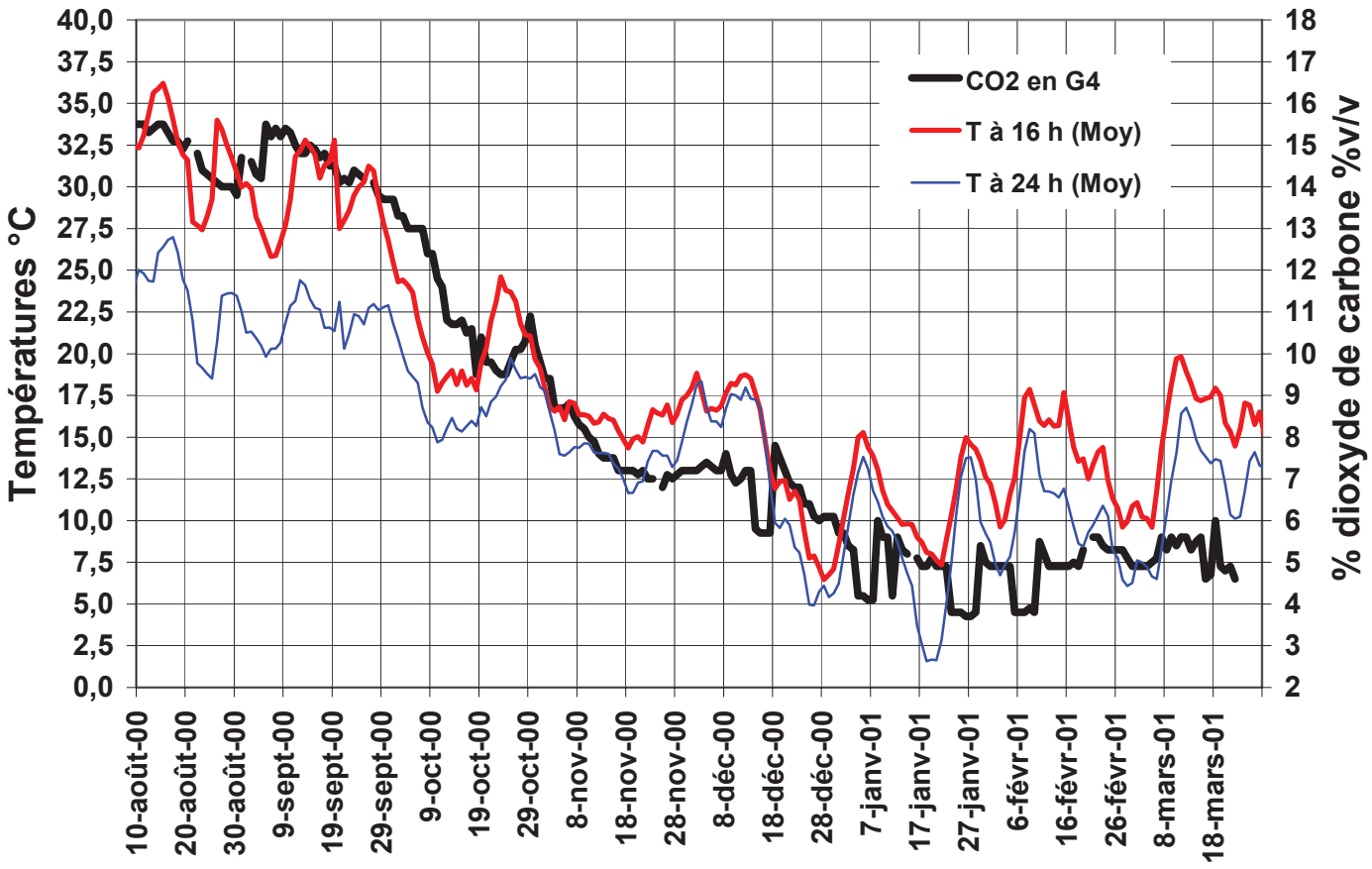


Figure 94 : *Corrélation entre CO_2 et température pour le point G4*

III.6. Enregistrements des paramètres généraux

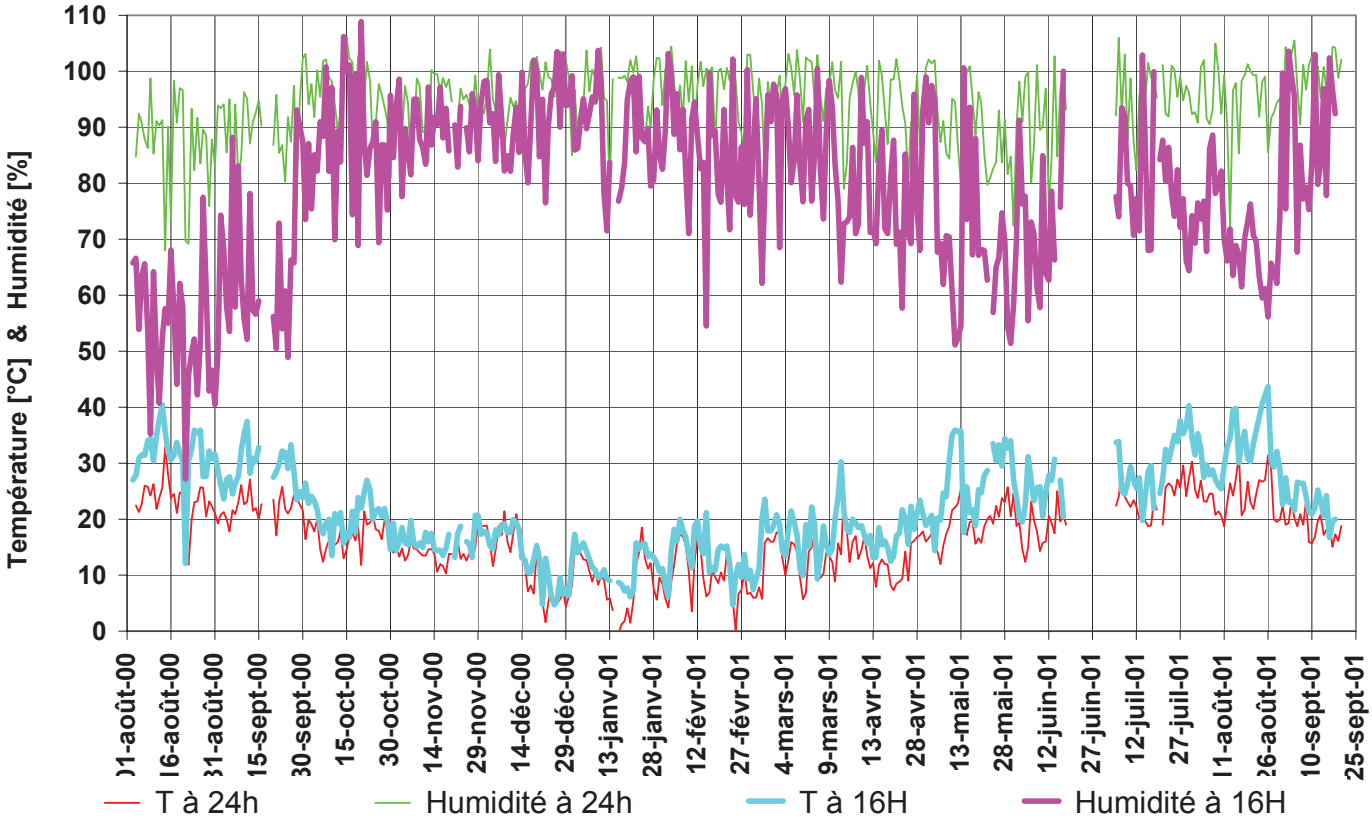


Figure 95 : *Suivi des températures et de l'humidité de l'air extérieur à 16h et 24h*

L'enregistrement des températures et de l'humidité de l'air extérieur, représentés sur la Figure 95, se fait grâce aux capteurs situés sur le toit du local d'analyse. Plutôt que des moyennes journalières, il a été préféré de ne montrer que les deux états extrêmes, approximativement d'après le suivi des premières journées d'enregistrement:

- ✓ 16h pour le plus chaud et le moins humide (ensoleillement)
- ✓ 24h pour le plus froid et le plus humide

L'analyse des courbes de la Figure 95 montre bien le caractère variable de ces paramètres météorologiques pouvant fortement évoluer d'une journée à l'autre. On retrouverait également cette disparité au sein d'une même journée en cas de conditions météorologiques changeantes. Dans le cas d'un suivi à long terme l'échelle de la journée n'est pas significative ce qui explique le choix de ne retenir que les deux valeurs supposées extrêmes (16h et 24h) afin de n'exprimer que les tendances éventuellement durables.

Bien évidemment les courbes de la Figure 95 mettent bien en évidence les deux situations extrêmes mais le plus intéressant est la nette caractérisation des saisons froides des saisons plus chaudes. Une période de gel ou de canicule est ainsi clairement identifiée.

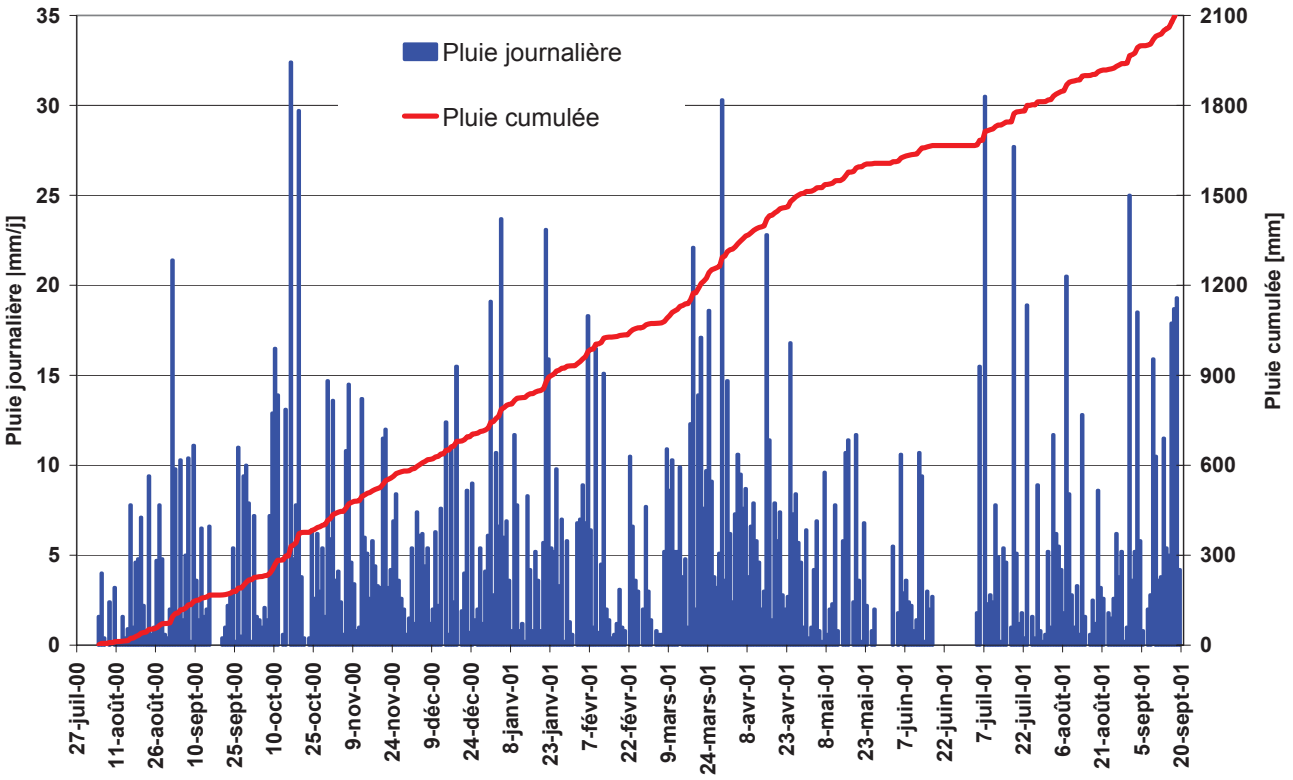


Figure 96 : *Pluviométrie journalière et cumulée*
perte des enregistrements entre fin juin et début juillet 2001

La nappe superficielle étant relativement sensible aux précipitations, il est important de connaître l'intensité des pluies sur cette zone. La Figure 96 présente les précipitations journalières sur le site ainsi que le cumul annuel en lame d'eau (mm). La mesure du cumul des pluies entre août 2000 et juin 2001, soit 1 an est de 1 800 mm d'eau alors que la moyenne annuelle nationale est de 760 mm/an. Ces valeurs particulièrement élevées traduisent une pluviométrie exceptionnelle effectivement constatée à cette époque en Picardie et Nord-Pas-de-Calais : il a plu entre octobre 2000 et avril 2001 2 à 3 fois plus que les moyennes habituelles. Les conséquences ont été dramatiques dans la Somme où la remontée des nappes a provoqué de dramatiques inondations.

III.7. Sondes multiparamètres

Deux sondes multiparamètres ont été installées dans les Pz9 et Pz16 à 1 m du fond. Elles enregistrent en continu à raison d'une mesure toutes les 4 heures les paramètres physico-chimiques de l'eau dans deux piézomètres. Les électrodes situées sur chacune de ces sondes permettent la mesure de la température, de la conductivité, du pH, du potentiel redox et de l'oxygène dissous dans les deux piézomètres.

Les concentrations en oxygène dissous sont très faibles, proches voire inférieures à la limite de détection de la sonde sauf pour les jours qui correspondent à une plongée de la sonde et donc à une introduction d'air dans le milieu.

La sonde plongée dans le Pz16 comprend une électrode de mesure de l'ammonium, toutefois la précision de cette mesure n'est pas satisfaisante. En effet, on observe une diminution progressive au cours du temps, peut-être due à l'impossibilité de calibrer régulièrement la sonde et à l'usure de cette électrode spécifique dont la durée de vie est de 2 à 3 mois. Les résultats obtenus n'avaient qu'une valeur indicative et le coût élevé du remplacement périodique de l'électrode ont abouti à l'abandon de la mesure de ce paramètre.

La température reste stable depuis le début des mesures, elle est comprise entre 11,5 et 12 °C pour le Pz16 et entre 12,5 et 13,5 °C pour le Pz9.

Le pH dans les deux cas est stable avec des valeurs situées entre 6,7 et 6,9 soit une eau proche de la neutralité.

Seules les courbes d'évolution de la conductivité et du potentiel redox seront donc présentées pour ces deux piézomètres.

III.7.1. Conductivité

La Figure 97 montre l'évolution de la conductivité qui mesure l'ensemble des espèces ioniques en solution dans le Pz16 et le Pz9 depuis le début du suivi : juillet 2000 pour le Pz16 et novembre 2000 pour le Pz9.

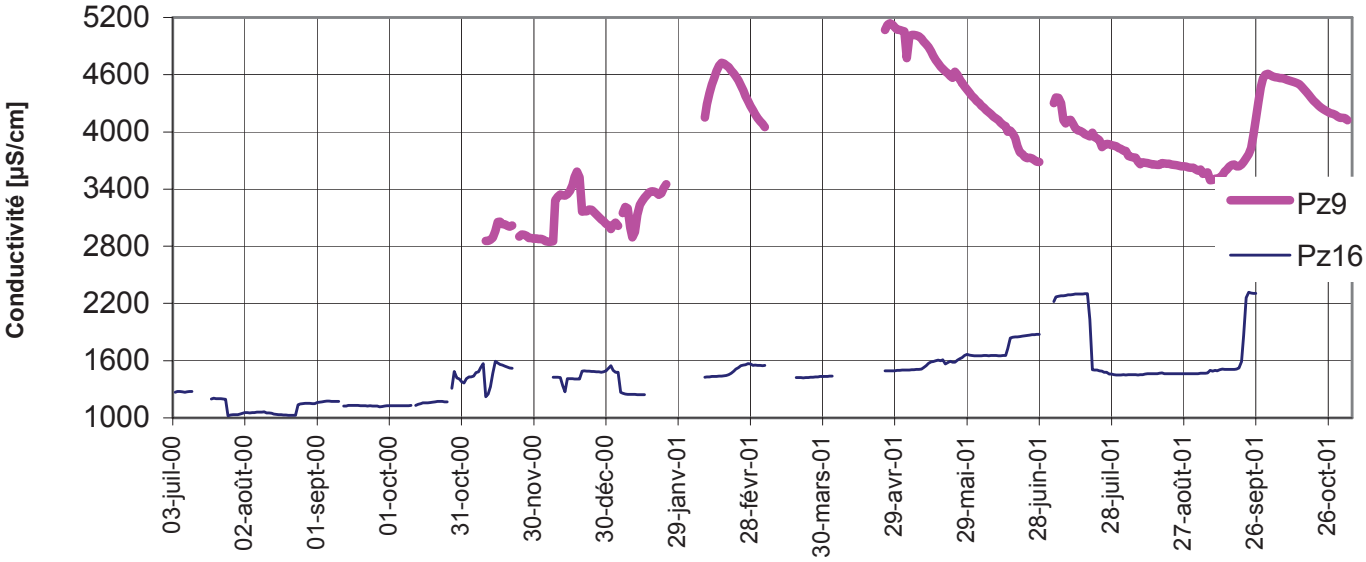


Figure 97 : *Evolution de la conductivité dans les piézomètres Pz16 et Pz9*
Remarque : L'absence d'enregistrement est due soit à une défaillance des batteries, soit à un retour des sondes en laboratoire pour maintenance

Entre les mois de juillet 2000 et avril 2001 la conductivité a peu varié dans le Pz16, les sauts observés correspondent en fait à des recalibrations de la sonde qui ont perturbé la mesure. Une correction de ces valeurs en fonction des recalibrations effectuées montre que la conductivité au cours de cette période est comprise entre 1200 et 1400 µS/cm. Par contre depuis le mois de mai on observe une augmentation progressive de la conductivité avec deux sauts brusques : une forte diminution vers le 20 juillet 2001 et une forte augmentation vers le 20 septembre 2001. La température et le pH restent stables sur cette période, ces évolutions traduisent soit une réelle perturbation du milieu soit un dysfonctionnement de l'électrode de mesure. Une année supplémentaire de mesures (non réalisée) aurait apporté plus d'informations.

La conductivité est beaucoup plus élevé dans le Pz9. Les sauts observés en décembre 2000 et mars 2001 correspondent également à des recalibrations. Sur cette période la conductivité varie entre 3000 et 4000 µs/cm. L'électrode de mesure a été remplacée au cours du mois d'avril 2001, à partir de cette date la conductivité varie entre 5000 et 3000 µs/cm et diminue progressivement. Le piézomètre Pz9 semble plus riche en composés polluants ce qui corrobore les résultats précédents (e.g. Figure 86 et Figure 87)

III.7.2. Potentiel rédox

La Figure 98 montre l'évolution du potentiel rédox pour les deux piézomètres depuis le début de leur suivi.

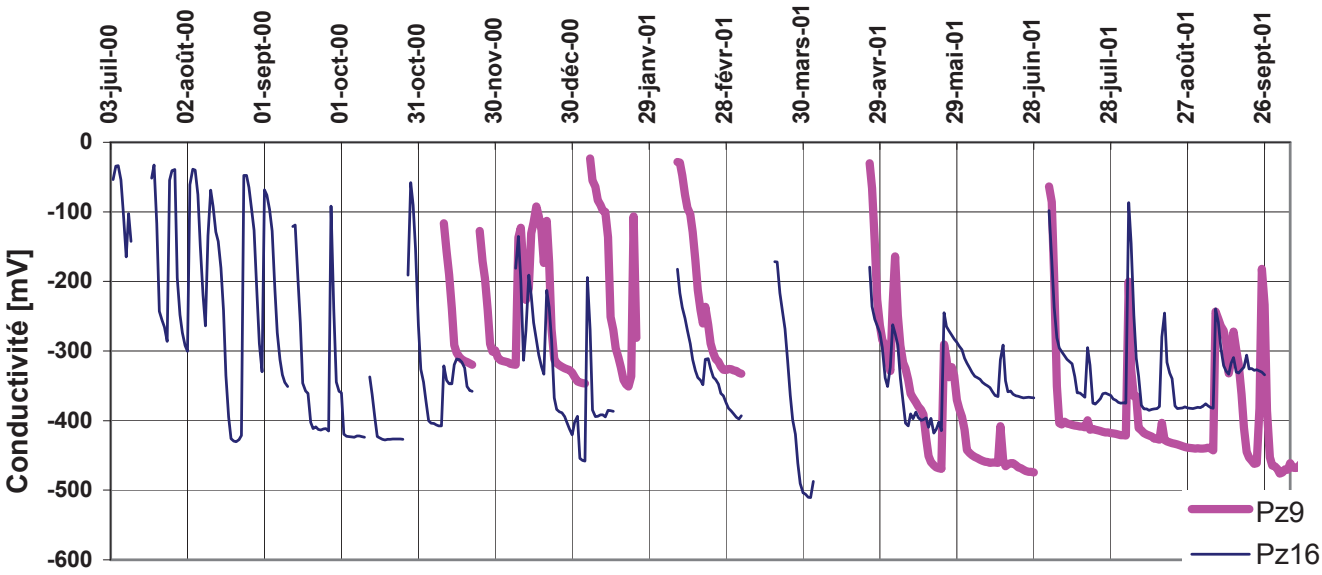


Figure 98 : *Evolution du potentiel rédox (Eh) pour les piézomètres Pz16 et Pz9*

Les évolutions sont similaires pour les deux piézomètres : les pics observés correspondent à une perturbation du milieu engendrée par l'introduction d'air lors des entrées et sorties des sondes dans les piézomètres. Au début de ce suivi, les sondes étaient contrôlées tous les 15 jours et aucune stabilisation des mesures n'était visible. La fréquence de maintenance est maintenant d'un mois, le potentiel rédox semble ainsi se stabiliser entre -300 et -400 mV pour le Pz16 et entre -400 et -500 mV pour le Pz9.

Cette mesure semble donc très sensible aux mouvements des sondes qui sont indispensables pour changer les batteries et nettoyer les sondes. Avec plus de 20 jours d'attente pour atteindre la stabilisation sur des périodes de maintenance d'un mois, l'intégration de ce paramètre à une sonde multiparamètres est discutable.

III.7.3. Bilan sondes multiparamètres

Les sondes multiparamètres sont distinctes du dispositif et donc non connectées au système d'acquisition centralisé. Elles étaient utilisées pour fournir l'enregistrement de paramètres indicatifs et renseigner sur l'opportunité de les intégrer au dispositif de surveillance en continu.

Au niveau des indicateurs, seuls le potentiel redox et la conductivité ont été retenus pour être présentés dans les résultats de cette expérimentation. Toutefois et suivant l'application, la température, le pH et éventuellement l'oxygène dissous ne doivent pas être systématiquement écartés. Pour l'ammonium, cet indicateur est caractéristique d'une arrivée de pollution, mais les conditions d'expérimentation n'ont pas permis de valider cette hypothèse. Le suivi de l'ammonium est toutefois maintenu pour une validation ultérieure.

Au niveau technologique, le fait de regrouper les capteurs sur un même support apporte un inconvénient majeur : l'entretien d'un capteur perturbe les mesures des autres. C'est le cas typique du potentiel rédox. De plus le stockage des batteries et de la centrale d'acquisition autonome dans le corps immergé de la sonde provoques les mêmes conséquences lors de la maintenance (remplacement batteries).

III.8. Restitution des données

III.8.1. Procédure retenue

On rappelle que sur site, la centrale d'acquisition enregistre en continu les données d'analyses de façon analogique toutes les 4 secondes. De toutes ces informations, elle n'en stocke effectivement en mémoire que les moyennes sur 2min pour la fluorescence UV et sur 10min pour les autres paramètres. Ce nombre important de données permet à l'échelle de la journée de contrôler l'évolution de chaque enregistrement qui doivent retranscrire parfaitement le déroulement des automatismes et des séquences d'analyses : ouverture des électrovannes, démarrage des pompes, analyses, rinçages, purges, etc… Cette visualisation pas à pas se fait au moyen du logiciel de communication DeLogger Pro © spécialement conçu pour dialoguer à distance avec la centrale d'acquisition.

La durée des analyses proprement dites pour chaque point de mesure eau ou gaz est d'une heure, ce qui se traduit par les créneaux observés sur les courbes d'enregistrements présentées en Figure 72 et Figure 73. Pour les eaux, le passage d'un piézomètre à l'autre se fait après un rinçage de la cellule avec de l'eau permutée alors que pour les gaz les analyses sur chaque canne se succèdent.

Parmi ces enregistrements, il faut rappeler qu'une seule valeur journalière a été retenue par point de mesure pour les analyses de gaz et des eaux. Les valeurs les plus représentatives pour les eaux se situent en fin d'analyse ce qui laisse le temps à l'échantillon fraîchement prélevé de parcourir les 200-250 m de conduites à faible débit (200 l/h) soit après 30 minutes. Pour le gaz c'est le début d'analyse qui est retenu car l'échantillon ne met que quelques minutes pour parvenir au local d'analyse (conduites de faible section). De plus, après quelques dizaines de minutes le volume de la canne de prélèvement est épuisé et c'est de l'air extérieur qui risque d'être aspiré ce qui rend inutile la poursuite de l'aspiration.

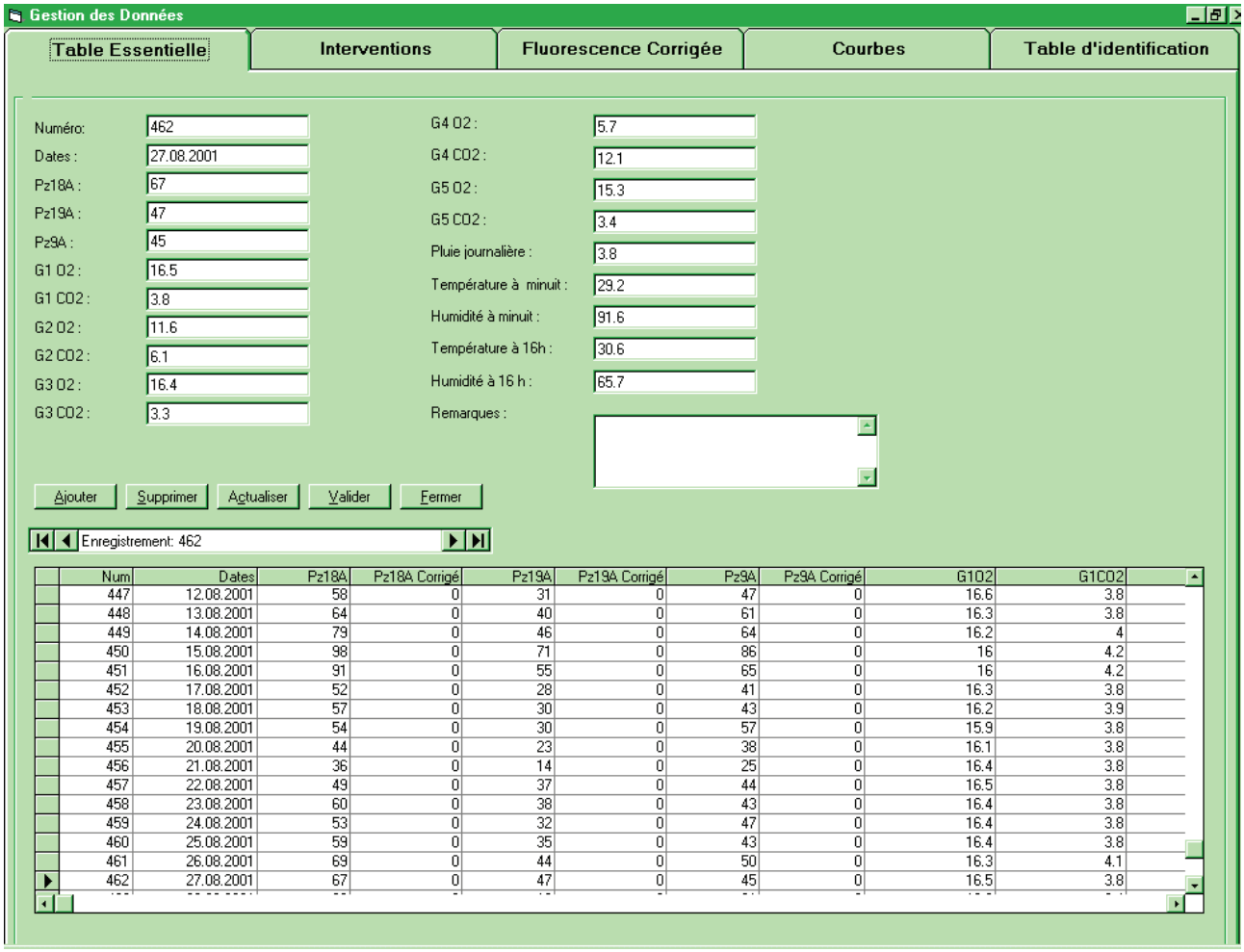
Pour la validation des données journalières, le contrôle visuel du déroulement du processus d'analyse est nécessaire pour le choix des valeurs à retenir. C'est la seule phase manuelle qui oblige l'opérateur à saisir les valeurs journalières brutes retenues dans la base de données essentielle.

III.8.2. Interface d'acquisition et de traitement Visual Basic ©

Pour la gestion des données, un prototype d'interface a été développé sous la forme d'une application réalisée à l'aide de Microsoft Visual Basic © qui permet la saisie des données, leur correction puis la visualisation par rapport au temps ou dans l'espace via une interconnexion avec Arcview.

Cette dernière à l'usage du gestionnaire du site permet à un non-spécialiste de l'acquisition de données informatiques de manipuler facilement les analyses et d'avoir une vision claire du fonctionnement du site sur un synoptique.

III.8.2.1. Base de données essentielles



Num	Dates	Pz18A	Pz18A Corrigé	Pz19A	Pz19A Corrigé	Pz9A	Pz9A Corrigé	G1O2	G1CO2
447	12.08.2001	58	0	31	0	47	0	16.6	3.8
448	13.08.2001	64	0	40	0	61	0	16.3	3.8
449	14.08.2001	79	0	46	0	64	0	16.2	4
450	15.08.2001	98	0	71	0	86	0	16	4.2
451	16.08.2001	91	0	55	0	65	0	16	4.2
452	17.08.2001	52	0	28	0	41	0	16.3	3.8
453	18.08.2001	57	0	30	0	43	0	16.2	3.9
454	19.08.2001	54	0	30	0	57	0	15.9	3.8
455	20.08.2001	44	0	23	0	38	0	16.1	3.8
456	21.08.2001	36	0	14	0	25	0	16.4	3.8
457	22.08.2001	49	0	37	0	44	0	16.5	3.8
458	23.08.2001	60	0	38	0	43	0	16.4	3.8
459	24.08.2001	53	0	32	0	47	0	16.4	3.8
460	25.08.2001	59	0	35	0	43	0	16.4	3.8
461	26.08.2001	69	0	44	0	50	0	16.3	4.1
462	27.08.2001	67	0	47	0	45	0	16.5	3.8

Figure 99 : *Saisie des données brutes (table essentielle)*

Toutes les données sont entrées manuellement par l'opérateur sur l'interface présentée sur la Figure 99. Pour chaque jour, il suffit d'inscrire dans les cases correspondantes les valeurs des analyses brutes ce qui a pour conséquence d'incrémenter la base de données essentielle (données brutes) sous format MS Access.

III.8.2.2. Interventions

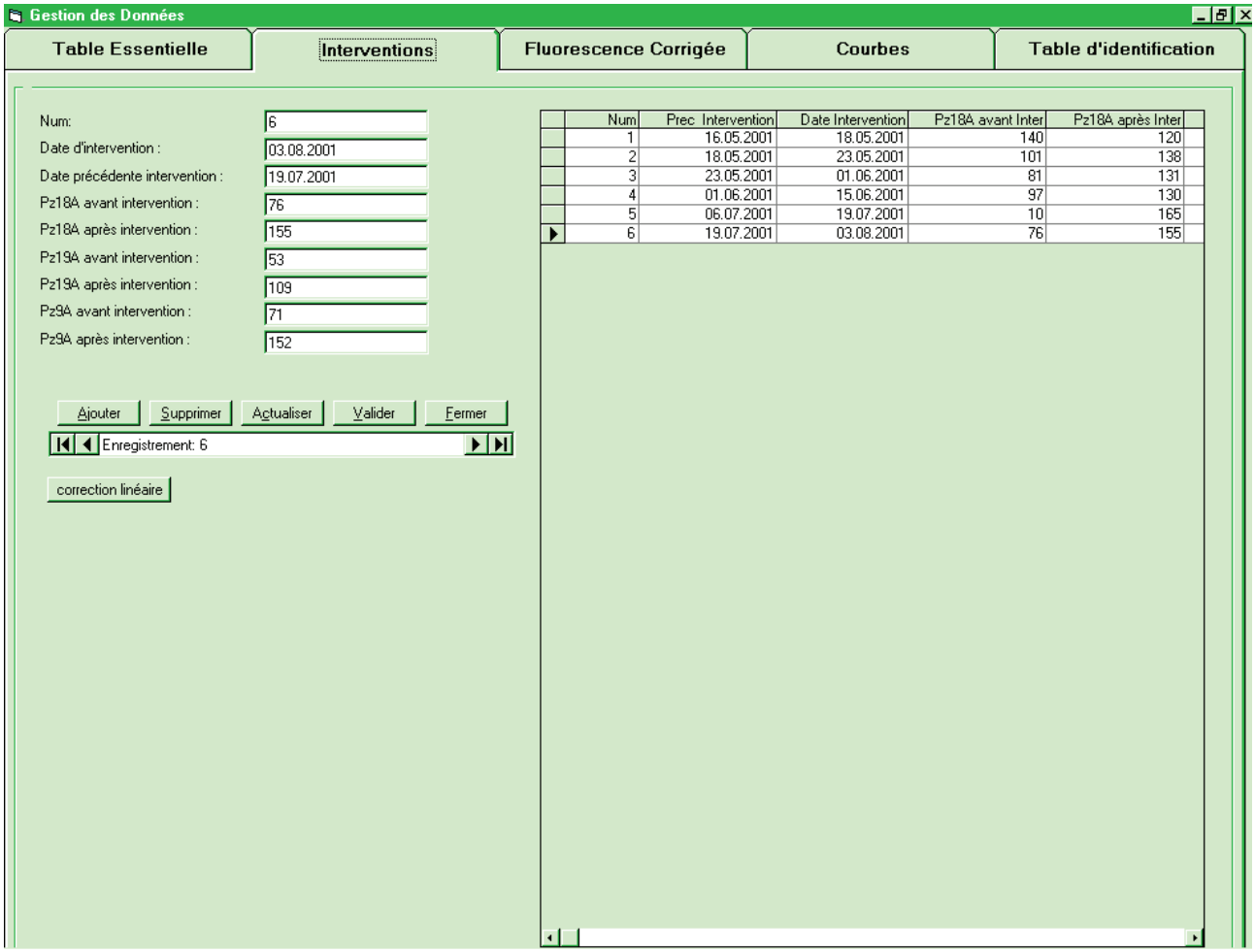


Figure 100 : *Saisie des interventions de maintenance*

Les opérations de maintenance servent à recalibrer le fluorimètre et à apprécier sa dérive dans le temps depuis la dernière intervention. La saisie des anciennes et nouvelles valeurs de fluorescence plus les dates d'interventions permettent une correction de l'erreur selon la loi de son choix. Dans notre cas, c'est une correction linéaire de l'erreur qui est utilisée pour compenser l'effet de l'encrassement de la cellule. Une pression sur le bouton "correction linéaire" à pour effet de générer une base de données consolidée avec les valeurs corrigées de fluorescence UV (Figure 100). On lance ainsi un processus de calcul de dérive du fluorimètre depuis la dernière calibration puis de correction d'erreur linéaire sur les enregistrements effectués. Le résultat de ce postraitement complétera les colonnes "Pz corrigé" de la base essentielle.

Pour les gaz et les paramètres généraux aucune dérive significative n'est à signaler. Il n'y a donc pas de correction.

III.8.2.3. Visualisation des courbes d'évolution dans le temps et l'espace

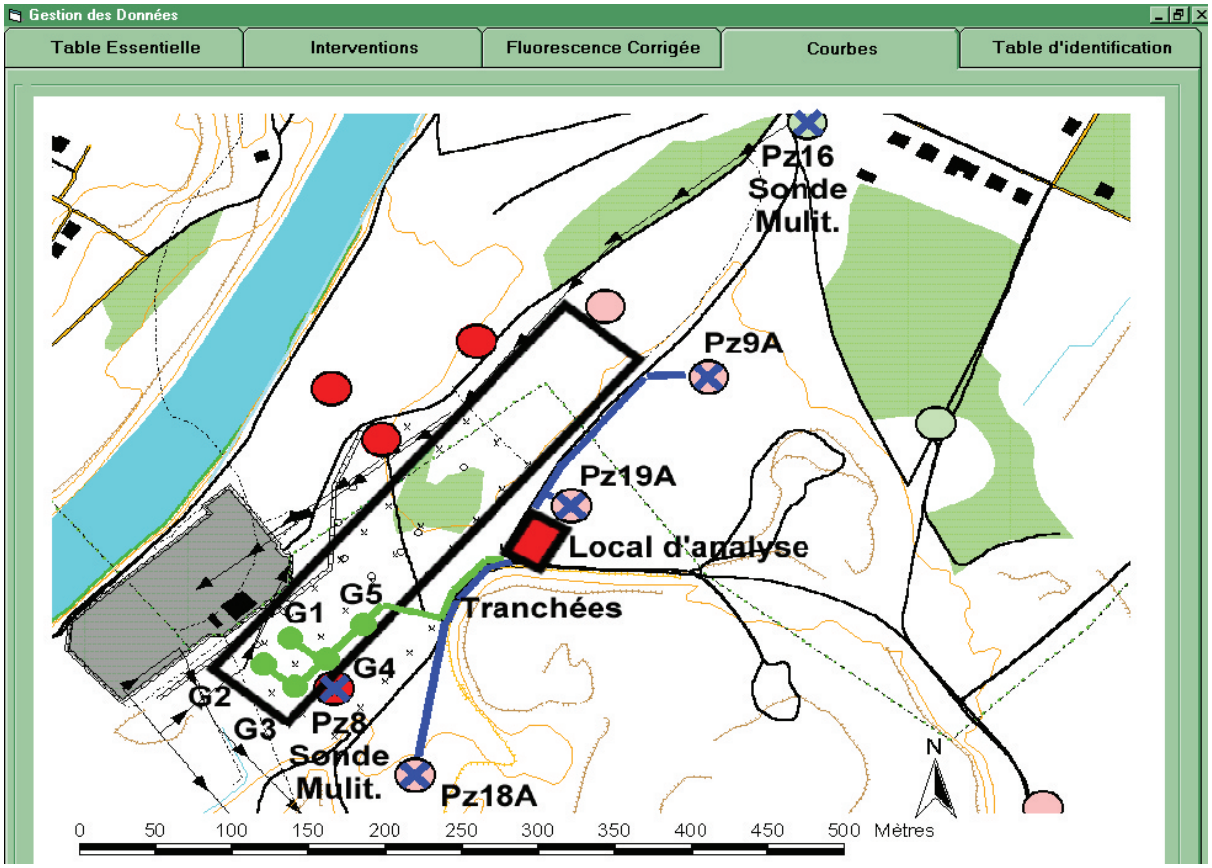
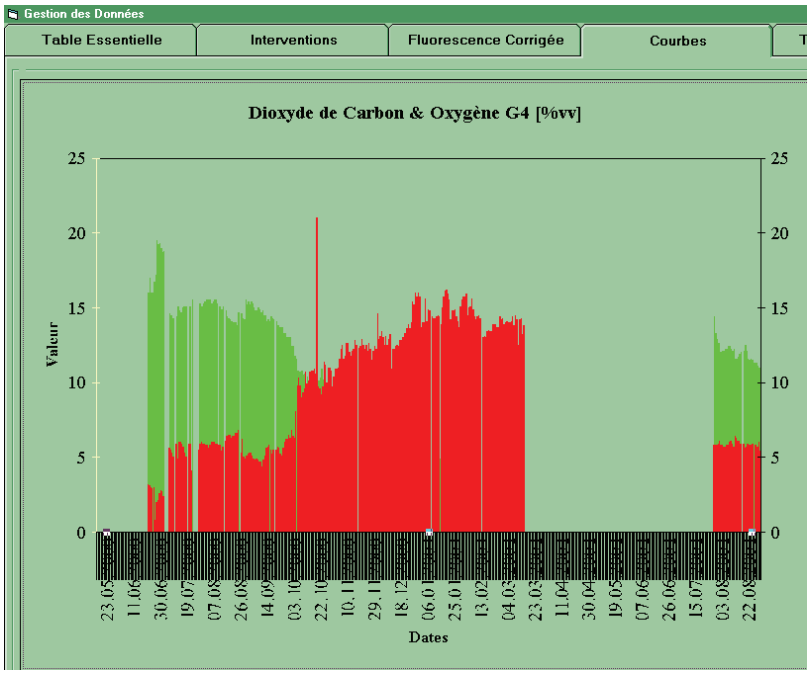


Figure 101 : *Fond de carte pour la restitution des données*



La restitution des données en fonction du temps se fait à partir d'un fond de carte (Figure 101) à partir duquel il suffit de cliquer sur le point de mesure désiré (eau, gaz ou paramètres généraux) pour pouvoir visualiser la courbe d'évolution (Figure 102).

Figure 102 : *Exemple de restitution pour les gaz*

IV. Retour d'expérience sur l'installation d'un Monitoring de Site

Suite à l'instrumentation d'un premier site, voici les premières recommandations pour de telles installations.

IV.1. Etude d'un projet de Monitoring

Un projet de "Monitoring de Site" sur un site pollué nécessite tout d'abord une campagne d'investigation complète afin de montrer l'origine de la pollution, sa localisation et sa dispersion. En général les études réglementaires ne suffisent pas, il faut avoir recours à des investigations complémentaires pour parfaitement caractériser le site. Ensuite, il faut conduire une étude de faisabilité complète (technique et économique) définissant aussi bien l'implantation des points de mesure et des équipements que les références du matériel nécessaire y compris les analyseurs. Les choix technologiques se feront en fonction des exigences du site et des moyens financiers disponibles. Il est vivement conseillé de n'acquérir aucun matériel ou équipement avant la fin de cette étude afin de garantir l'homogénéité et la robustesse de l'ensemble. Au final, cette étude doit aboutir aux plans "bon pour exécution" avant d'entamer les travaux d'instrumentation proprement dits.

IV.2. Alimentation en ressources (énergies, télécom et eau)

Il est indispensable de recenser les réseaux susceptibles d'alimenter le site à instrumenter (électricité, téléphone et eau). Bénéficier d'une alimentation électrique standard (220/380 V) est en général bien plus simple et moins cher que la production de sa propre énergie. Dans le cas du solaire, solution initialement envisagée, le surcoût est très important. Outre les panneaux solaires relativement vulnérables, cela impose le passage en basse tension et l'utilisation d'appareillages spécifiques plus onéreux. La construction d'une ligne aérienne triphasée privée depuis un compteur chantier EdF est dans la plupart des cas un meilleur choix, d'autant plus que de nombreuses entreprises proposent du matériel (câbles et supports) de récupération à coûts réduits. Les lignes téléphoniques utilisent les même supports, mais l'utilisation du GSM peut être un meilleur choix. Pour l'eau potable éventuellement nécessaire pour la maintenance, l'ouverture d'une tranchée pour la mise hors gel des conduites peut s'avérer non rentable au vu des besoins. Pour notre part, cette solution n'a pas été retenue au profit d'un approvisionnement manuel d'un réservoir d'eau distillée.

Il très important de disposer d'une source d'énergie électrique de secours en cas de coupure (orage). Soit les appareillages vulnérables (centrale d'acquisition, analyseurs, ordinateur, etc…) disposent de leurs propres batteries de secours, soit il faut avoir recours à un onduleur permettant la fin des cycles d'analyse, l'envoi d'une alarme, un minimum de communication à distance ou la mise en sécurité de l'installation avant une période d'interruption.

IV.3. Choix du type d'équipements

Il est important de sélectionner rigoureusement le type d'appareillage, qu'il s'agisse d'analyseurs, de capteurs ou encore d'équipements techniques avec comme critères principaux le fonctionnement en milieu hostile, l'autonomie, et la maintenance réduite.

IV.3.1. Pompes immergées et régulation des débits

Le choix des pompes est contraint par la puissance électrique nécessaire au pompage : ainsi, pour alimenter une pompe électrique distante de 250 m les abaques de dimensionnement FLYGT indiquent une puissance de 0,55kW en triphasé avec des câbles de 4x1,5mm², pour que la chute de tension reste inférieure à 3%. Leur fonctionnement est basé sur le "tout ou rien" donc sans possibilité d'asservissement pour la régulation du débit de prélèvement. Ce réglage se fait de manière mécanique avec une vanne pointeau de bridage et un débitmètre à flotteur sur la conduite dans le local. Cette solution ne donne pas entière satisfaction en raison du colmatage progressif du pointeau entraînant une diminution linéaire du débit pouvant atteindre une obstruction complète si la maintenance est trop espacée (risque d'endommagement des pompes). Une régulation électrique du flux de prélèvement basée sur une consigne de débit est préférable mais nécessite l'installation d'un débitmètre électronique avec sortie analogique. Techniquement, la régulation peut se faire par un pilotage de la vanne pointeau ou, mieux encore par le pilotage d'un variateur de fréquence, via un automate, agissant directement sur la puissance de la pompe. Quelle que soit l'option retenue, il faut un asservissement du débit de prélèvement fiable pour garantir la représentativité des mesures et la pérennité de l'installation.

IV.3.2. Précision des capteurs et des analyseurs

Un "Monitoring de Site" nécessite un matériel conçu pour un fonctionnement autonome, fiable dans le temps et robuste même si la précision de la mesure n'atteint pas le standard des analyses de laboratoire. C'est le critère de maintenance (facilité, fréquence, etc…) et de tenue dans le temps qui doivent guider les choix. Le type d'appareils à sélectionner doit favoriser la légèreté de la maintenance à la précision de la mesure. Peu ou pas de maintenance conduit vers des analyseurs moins précis, plus globaux que du matériel de laboratoire mais suffisants pour une connaissance de l'évolution générale du site.

Le prélèvement manuel d'échantillons dans le cadre de visites de maintenance autorise des analyses plus précises en laboratoire et un calage des résultats de terrain

Les matériels mis en place sur site correspondant à cet objectif sont :

- ✓ l'analyseur de biogaz (calibration tous les 3 mois) ;
- ✓ fluorimètre (calibration tous les 15 jours) ;
- ✓ pluviomètre à augets (filtre à vérifier tous les 3 mois).

Faute de matériel de calibration adapté, les indications de capteur d'humidité et de température ne sont qu'indicatives. Un simple thermocouple précis au 1/10 de degrès est recommandé pour les mesures de la température extérieure.

IV.3.3. Analyse de la teneur en HAP

L'analyse de la teneur des HAP dans l'eau par la technique de la fluorescence UV n'a pas été convaincante : les dérives de l'appareil dans le temps étaient tellement importantes (plus de 50% après 15 jours) qu'elles masquaient les éventuelles évolutions de concentrations des eaux. Aucun suivi quantitatif précis des HAP n'est à attendre de ce type d'analyse, tout au plus une approche qualitative peut être envisagé sous réserve d'améliorer le dispositif (prélèvement et analyse). Toutefois, la mesure n'est pas sélective aux HAP car les longueurs d'onde d'excitation et d'émission choisies peuvent faire fluorescer d'autres composés contribuant ainsi au signal.

Les éventuelles modifications envisageables sur site sont :

- Changement d'analyseur :
  Actuellement les technologies disponibles ne permettent pas l'analyse sélective des HAP en continu. Ce dispositif expérimental pourrait servir de plate-forme d'essai pour la mise au point de nouveaux analyseurs.
- Modification du prélèvement des eaux et de l'utilisation de l'analyseur sur site :
  Il est évident que le passage massif d'eau brute dans la cellule d'analyse, au pire sa stagnation, altère énormément l'analyse. Cette technique utilisée ici est à proscrire au regard des piètres résultats obtenus. Il apparaît également inutile de chercher à affiner les techniques de calibration et de correction des données sans régler le problème de dérive chronique de l'analyseur
  Une solution à ce problème consisterait à ne prélever qu'une petite partie des eaux pompées pour injection dans la cellule d'analyse après filtration, puis nettoyage immédiat comme cela se fait manuellement sur une paillasse. Ceci nécessite le montage d'un automatisme spécifique et l'adaptation du matériel d'analyse avec pourquoi pas plusieurs cellules ou leur interchangeabilité en automatique. L'appareil doit également pouvoir se mettre en veille entre 2 analyses pour économiser la lampe.

Une profonde modification des boucles hydrauliques (e.g. l'installation d'un préleveur automatique) semble nécessaire quel que soit l'analyseur d'HAP car l'agressivité des eaux brutes altère inévitablement (usure des parois, encrassement et salissures) les appareils de contrôle (vannes, débimètre, etc…) et de mesure. Cela réduirait le volume d'eau traversant la cellule d'analyse et donc son encrassement. Les fonctionnalités de bases recherchées sont d'assurer la régénération des eaux et de permettre l'injection du minimum nécessaire dans l'analyseur pour préserver son état.

IV.3.4. Branchement des capteurs/analyseurs

En règle générale, les capteurs/analyseurs nécessitent une alimentation électrique et disposent d'une sortie analogique pour la récupération des données sur la centrale d'acquisition. Il faut veiller à une certaine homogénéité des signaux (4-20 mA ou 0-1 V) pour simplifier les connexions lors de la sélection des capteurs.

IV.3.4.1. Alimentation électrique des capteurs/analyseurs

Les gros analyseurs, type Fluorimètre, analyseur de biogaz, etc…, fonctionnent en 220V alternatif. Les appareils du type sondes pour les paramètres généraux, demandent des alimentations basses tensions qu'il faut gérer pour éviter la multiplication du type de source. Pour la sonde de mesure de l'humidité du sol, par exemple, il est déconseillé de l'alimenter en continu : une alimentation basse tension de quelques secondes avant la mesure suffit mais impossible à réaliser sans automate.

La configuration d'alimentation des analyseurs/capteurs doit être un critère de choix pour la simplicité de l'installation. Sont à privilégier :

- ✓ les alimentations 220 V classiques pour les analyseurs importants ;
- ✓ les capteurs ne nécessitant pas d'alimentation, comme les thermocouples pour la température ;
- ✓ les capteurs supportant une alimentation basse tension continue variable dans une fourchette de 6 à 24 V.

Enfin, pour assurer la longévité des analyseurs, l'utilisation d'appareils équipés d'une mise en veille lors des périodes (importantes) de non-utilisation est fortement recommandée.

IV.3.4.2. Sorties analogiques des capteurs analyseurs

Il faut veiller aux données disponibles sur les sorties analogiques et leur format. Sur ce point, l'analyseur de biogaz sort une nouvelle fois du lot avec 3 sorties 0-1 VDC, pour les concentrations en CO_2, O_2 et CH_4 ; simple et efficace. Le fluorimètre est également équipé d'une sortie analogique 0-1VDC mais uniquement pour la teneur en HAP. Impossible donc d'enregistrer de manière similaire, la température de l'eau pourtant mesurée et affichée sur l'écran de l'analyseur. Le PID est équipé effectivement d'une sortie, mais sa connexion demande l'achat auprès du fabricant d'une prise 3 broches spéciale non fournie avec l'appareil car facturée en pièce détachée à un tarif rédhibitoire (450 €)… Le problème vient en fait des petits capteurs et sondes pour les paramètres généraux. Certaines sondes comme la sonde de mesure de la température du sol, une sonde de température de l'air (non utilisée), le baromètre (non utilisé), fournissent une résistivité et un tableau de correspondance. Il n'est malheureusement pas possible de transcrire précisément ces correspondances de manière analytique pour le traitement de l'information par la centrale d'acquisition. On doit alors se contenter d'une équation approchée au détriment de la précision du capteur. Inadaptés à notre utilisation, ces capteurs pourtant relativement précis et chers sont en fait prévus pour fonctionner avec des boîtiers d'analyse spécifiques qui transforment la résistivité en donnée physique.

Pour une plus grande simplicité et pour diminuer les coûts il convient d'identifier les formats pré-programmés dans la centrale d'acquisition qui sont en général les standards couramment utilisés. Par exemple :

- pour la température : utilisation de thermocouples économiques (type B, C, D, E, G, J, K, R, N, S ou T) ou de sondes platine, type PT100 ;
- pour les autres analyseurs et sondes diverses des paramètres généraux : utilisation de sondes avec sortie tension 0-1VDC, 0-5VDC ou courant 4-20mA (le dernier chiffre correspondant à la pleine échelle du capteur) pour chaque paramètre. Dans ce dernier cas une résistance de shunt est nécessaire mais souvent intégrée dans les centrales d'acquisition.

Avec l'utilisation d'une centrale d'acquisition, les capteurs/analyseurs munis de leur propre mémoire, d'un système de traitement de l'information ou nécessitant la connexion d'un ordinateur pour le transfert des données sont à proscrire.

IV.3.5. Matériel hydraulique, électrique ou pneumatique

La logique basée sur la précision de la mesure, suivie au départ du projet a été revue au profit de l'acquisition de fournitures industrielles, celles-ci étant 5 à 10 fois moins onéreuses et beaucoup plus robustes que du matériel de laboratoire. Autre avantage : les fournitures industrielles proposent un très grand choix de références toutes compatibles car conformes aux mêmes normes industrielles. La maintenance en sera d'autant simplifiée (rapidité et efficacité) grâce à un approvisionnement local aisé. Une simple vérification sur la compatibilité chimique des matériaux avec les fluides à analyser suffit dans la majorité des cas pour ne pas altérer la précision de la mesure dont est capable un dispositif de terrain.

Les installations électriques doivent également être conçues dans le respect des normes de sécurité en vigueur, afin de garantir la protection des opérateurs non habilités aux câblages électriques. Les alimentations à retenir sont le 380 V triphasé pour la puissance et le 24 V DC pour l'énergie de commande.

IV.3.6. Dispositifs de contrôle (visuels)

Il est nécessaire d'équiper le système de moyens de contrôles visuels et rapides pour les débits et les pressions. En cas d'utilisation d'un débitmètre électronique, il faut s'assurer qu'il dispose d'un afficheur direct, sinon avoir recours aux classiques débitmètres à flotteur. Le problème des pressions est plus délicat car les cellules des analyseurs n'admettent pas les surpressions. Il est donc impératif d'équiper les boucles en manomètres et de limiteurs de pression par sécurité. Il est éventuellement possible de compléter l'installation avec un pressostat pour couper l'alimentation des pompes en cas de surpression accidentelle.

IV.3.7. Automatisme et acquisition des données

Dans la configuration installée, les automatismes sont contrôlés par une centrale d'acquisition en utilisant ses fonctions alarmes normalement destinées à actionner de petits récepteurs électriques en fonction de conditions sur les entrées. En créant une entrée de type "horloge", il est possible de programmer jusqu'à 20 alarmes qui pourront agir sur les 14 sorties possibles : 5 contacteurs secs et de 9 entrées/sorties analogiques. Ces dernières, configurées en sorties, jouent le rôle de masses pilotées mais sont plus délicates à utiliser que des contacteurs secs. Avec 17 relais thermiques à piloter (pompes et électrovannes) et seulement 14 sorties possibles, les "fonctions automatismes" de la centrale d'acquisition ont été surexploitées en câblant les relais thermiques de l'armoire électrique de manière non conventionnelle (pilotage par des masses et non par des contacteurs secs). Les 5 contacteurs secs ont été réservés aux pilotages des pompes (5 pompes en tout). Les masses pilotent toutes les électrovannes dont trois doublés (2 relais thermiques branchés en parallèle) pour pallier aux 3 sorties manquantes. Le montage et la limitation du nombre d'alarmes pour le pilotage sous DeLogger Pro © ont permis d'obtenir un résultat acceptable pour le pilotage du système. Néanmoins, ce détournement des fonctions alarmes pour le pilotage d'un process n'est pas recommandé et peut être avantageusement remplacé par un automate. Ce dernier s'impose donc d'autant plus que DeLogger Pro © limite les alarmes à 20, soit 20 commandes maximums pour le process.

L'automate est indispensable dans ce genre d'outil. Il devrait posséder un minimum de 30 entrées (transitions logiques) et 30 sorties (contacteurs secs) de sorte à pouvoir envisager une augmentation des points de mesure (piézomètres, cannes de gaz, etc…). Le principe des modules d'extension est pratique car cela laisse de très larges possibilités de développements ultérieurs. Ce dernier gérera la totalité du process pour l'acheminement des échantillons, la mise en service des analyseurs et la régulation du débit de prélèvement. Les transitions logiques sont des validations pour la succession des tâches. L'automate autorise de larges possibilités en programmation d'automatismes et est compatible avec toutes sortes de commandes manuelles (boutons + voyants) pour les manœuvres de maintenance.

D'une manière générale, il convient de séparer l'acquisition des mesures du pilotage des automatismes. Ce sont deux techniques spécifiques complémentaires qui doivent se traiter avec du matériel adapté. La centrale d'acquisition installée sur le site expérimental, bien que mauvais automate, est bien adaptée à l'acquisition, à la transformation des données et à leur transfert par modem.

L'ajout d'une carte mémoire supplémentaire interne de 90 000 mesures à la mémoire interne d'une capacité de 13 000 mesures permet de :

- ✓ assurer le démarrage du process où tous les capteurs sont scrutés avec des pas de temps très courts (détection de dysfonctionnement) ;
- ✓ modifier une commande de programmation sans perte des données stockées ;
- ✓ assurer 3 mois d'autonomie de stockage.

Toutefois, actuellement il faut rechercher les capacités d'un disque dur courant (50 Go) voir le coupler l'acquisition à un ordinateur ordinaire installé dans le local.

IV.4. Pilotage à distance

Pour cette expérimentation nous disposons d'une centrale d'acquisition interrogeable à distance via un modem et un logiciel spécifique. Parfaitement opérationnel, l'inconvénient est qu'il faille disposer de ce logiciel payant (DeLogger Pro) spécifique au constructeur de la centrale pour lire les informations recueillies sur le site.

Il est préférable d'utiliser la technologie Internet haut débit couplée au GSM. Les constructeurs d'automate et de centrale d'acquisition proposent des modules de communication qui contiennent de mini sites web et une adresse IP. Ces derniers, configurables suivant les besoins de l'utilisateur, permettent la lecture des informations et le pilotage de l'automate, etc… La communication se fait depuis n'importe quel ordinateur disposant d'une connexion Internet et d'un navigateur. Les aspects sécurité sont gérés par des autorisations d'accès variables en fonction du type de personnes connectées. La technique GSM permet une dispense de ligne télécom.

IV.4.1.1. Coûts

Le coût global de ce projet a été d'environ 170 k€. La répartition des coûts est détaillée ci-dessous pour information

Tableau 15.

Tableau 15 : *Détail des coûts du projet MCSP*

DESIGNATION	Unité	Nb	Besoin	Prix unitaire	Prix total [€ HT]
LOT Analyse eaux de 4 piézomètres par Fluorimètre UV					
Tranchées					
Tranchée en 800x500 avec remblaiement sable	m	800	800	7.62 €	6 097.96 €
Fourreau bleu protec. eau polyéthylène cannelé Ø50/63 mm	m	800	800	0.56 €	451.25 €
Fourreau rouge protec. élect. polyéthylène cannelé Ø32/40 mm	m	800	800	0.43 €	347.58 €
Grillage de signalisation	m	800	800	0.10 €	82.93 €
Manchon pour fourreau polyéthylène cannelé Ø50/63 mm	unité	25	25	1.15 €	28.81 €
Câbles électriques 4x4mm² rigide en gaine (RO2V 4G4)	m	450	450	1.05 €	471.30 €
Câbles électrique 4x2,5mm² rigide en gaine (RO2V 4G2,5)	m	500	500	0.59 €	293.46 €
Câbles électriques 2x1,5mm² rigide en gaine (RO2V 2G1,5)	m	700	50	0.27 €	13.72 €
Flexible refoulement PVC qualité alimentaire Ø25/32 mm	m	800	800	2.11 €	1 690.35 €
Analyses dans local de mesure					
Fluorimètre UV, Turner Designs avec son équipement	unité	1	1	17 988.98 €	17 988.98 €
Pompes alimentation Fluorimètre multicellulaire inox	unité	1	1	1 131.17 €	1 131.17 €
Variateur de fréquence pour pompe multicellulaire	unité	1	1	579.31 €	579.31 €
Vanne bridage Ø25 int	unité	5	5	15.24 €	76.22 €
Electrovannes pour Ø25 int	unité	5	5	38.11 €	190.56 €
Tube PVC Ø200	m	1	1	30.49 €	30.49 €
Piquage sur tube PVC Ø200 pour électrovanne Ø25	unité	5	5	7.62 €	38.11 €
Bac 500x800x200	unité	1	1	152.45 €	152.45 €
Clapets anti-retour pour déversement	unité	1	1	15.24 €	15.24 €
Tête de piézomètres					
Pompes Péristaltiques	unité	3	0	1 082.39 €	0.00 €
Pompes auto-amorçantes de surface (dont 1 en secours)	unité	5	5	152.45 €	762.25 €
Crépine anti-retour pour flexible Ø25 int	unité	5	5	4.60 €	23.02 €
Embouts pour crépines anti-retour en Ø25 int	unité	5	5	4.70 €	23.48 €
Buse PVC Ø500 pour regard en barres de 6m	m	6	6	38.87 €	233.25 €
Bouchon PVC pour buse Ø500	unité	4	4	70.13 €	280.51 €
Isolant polystyrène ep 200mm	m²	2	2	7.62 €	15.24 €
Inst. regard avec béton propreté et évacuation eaux	unité	4	4	114.34 €	457.35 €
Exhaure					
Puisard	unité	1	1	304.90 €	304.90 €
Flexible refoulement	m	500	500	1.52 €	762.25 €
Pompe reprise pilotée par l'amont	unité	1	1	304.90 €	304.90 €
Sous total lot analyse eaux de Pz 8-18-16-19					***32 847.05 €***
LOT Analyse de Gaz					
Analyseur COV (PID Foxboro TVA 1000 portable)	unité	2	1	6 479.08 €	6 479.08 €
Analyseur de Biogaz (Spectro IR ADC LFG 20 portable)	unité	2	1	3 866.41 €	3 866.41 €
Cannes de prélèvement avec petit capot en tête	unité	5	5	15.24 €	76.22 €
Tranchée en 600 de profondeur	m	200	200	3.81 €	762.25 €
Fourreau bleu protec. eau polyéthylène cannelé Ø50/63 mm	m	400	400	0.56 €	225.62 €
Grillage de signalisation	m	200	200	0.10 €	20.73 €
Rilsan Polypropylène 3/8"	m	10	10	0.00 €	0.00 €
Rilsan Polypropylène 1/4"	m	1020	1500	0.00 €	0.00 €
Raccords Rilsan divers	forfait	0	1	76.22 €	76.22 €

DESIGNATION	Unité	Nb	Besoin	Prix unitaire	Prix total [€ HT]
Electrovannes	unité	8	6	0.00 €	0.00 €
Câbles électrique 3G1,5mm² rigide en gaine	m	1000	100	0.30 €	30.34 €
Sous total lot analyse de gaz des 5 cannes de prélèvement					***11 536.88*** €
LOT Sondes pour Analyses Globales					
Sonde température sol	unité	1	1	108.24 €	108.24 €
Sonde humidité sol	unité	1	1	1 387.29 €	1 387.29 €
Sonde température air	unité	1	1	402.47 €	402.47 €
Sonde humidité air	unité	1	1	0.00 €	0.00 €
Capteur pression atmosphérique	unité	1	1	473.35 €	473.35 €
Pluviomètre	unité	1	1	533.57 €	533.57 €
Sondes multiparamètres Memodat 4 : O2, Cond, Ph, Rédox	unité	1	1	6 838.53 €	6 838.53 €
Sondes multiparamètres Memodat 4 : O2, Cond, Ph, Rd, z, NH4		1	1	8 211.67 €	8 211.67 €
Câbles sondes multiparamètres Memodat 4 + Frais divers	unité	1	1	885.50 €	885.50 €
Sous total lot sondes pour analyses globales					***18 840.61*** €
LOT Matériel Divers					
Ordinateur Portable	unité	1	1	4 196.92 €	4 196.92 €
Transformateur 24 V 160 VA	unité	1	1	35.86 €	35.86 €
Transformateur 12 V 83 VA	unité	1	1	24.59 €	24.59 €
Pince coupe Rilsan 4-12mm	unité	1	1	21.34 €	21.34 €
Pince coupe Rilsan 12-25mm	unité	1	1	24.39 €	24.39 €
Cosses femelles	unité	100	100	0.32 €	32.01 €
Gaine thermorétractable	m	10	10	3.45 €	34.51 €
Petit matériel divers (pinces, tournevis, cosses, etc....)	forfait	1	1	45.73 €	45.73 €
Sous total Matériel divers					***4 415.36*** €
LOT Bungalow, Centrale d'acquisition, alimentation, communication					
Boîtier convertisseur boucle de courant pour Sondes Multi	unité	4	4	133.39 €	533.57 €
Câble blindé pour boucle de courant	m	1200	1200	0.91 €	1 097.63 €
Convertisseur DB25 vers DB9 pour boucle de courant	unité	4	4	5.49 €	21.95 €
Câble 2x1 mm² blindé (RHC1 2x1,5)	m	20	20	1.42 €	28.33 €
Centrale d'acquisition Datataker 500 + extension + automate	unité	1	1	6 357.12 €	6 357.12 €
Logiciel pour le pilotage de l'automate DeLogger Pro	unité	1	1	1 128.12 €	1 128.12 €
Modem	unité	1	1	272.88 €	272.88 €
Interface Modem	unité	1	1	891.83 €	891.83 €
Carte PCMCIA Type 2 + câble liaison + port et emballage	unité	1	1	362.83 €	362.83 €
Relais 5V (commande)/ 12-24V (puissance)	unité	10	10	6.10 €	60.98 €
Armoire électrique avec platine (300x500x200)	unité	1	1	81.95 €	81.95 €
Platine pour armoire électrique 500x300	unité	1	1	20.04 €	20.04 €
Bungalow Espace (fourniture et livraison)	unité	1	1	10 610.45 €	10 610.45 €
Installation Bungalow	unité	1	1	1 726.64 €	1 726.64 €
Connexion réseaux EdF (compteur 18kVa)	forfait	1	1	900.97 €	900.97 €
Consommation EdF	forfait/an	3	3	762.25 €	2 286.74 €
Connexion Réseau France Télécom	forfait	1	1	91.47 €	91.47 €
Consommation F. Télcom	forfait/an	3	3	152.45 €	457.35 €
Alimentation énergie (électricité et télécom)	unité	1	1	15 007.26 €	15 007.26 €
Télésurveillance	forfait/an	3	3	5 335.72 €	16 007.15 €
Assurance	forfait/an	3	3	1 524.49 €	4 573.47 €
Nivellement piézomètres	forfait	1	1	3 048.98 €	3 048.98 €
Sous total lot bungalow					***65 567.70*** €
LOT Divers					
Sous traitance EMSE-SE	forfait/an	3	3	15 244.90 €	45 734.71 €
Logiciel Feflow avec maint. (80% recherche/enseignement)	unité	1	1	2 591.63 €	2 591.63 €
Logiciel GD Base	unité	1	1	10 999.96 €	10 999.96 €
Logiciel supervision G2 (75% recherche/enseignement)	unité	1	1	8 842.04 €	8 842.04 €

DESIGNATION	Unité	Nb	Besoin	Prix unitaire	Prix total [€ HT]
Déplacement du personnel (congrès, réunions, etc...)	forfait/an	3	3	6 097.96 €	18 293.88 €
Sous total lot divers					20 885,52
				s/total	*154 093,12 €*
				imprévu 10%	15 409,31 €
TOTAL					***169 502,43 €***

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La mise en place d'une méthodologie de MCSP (Monitoring Continu de Site Pollué) intégrée demande une quantité significative de mesures et d'informations diverses qui ne sont pas toujours disponibles et/ou fiables. Pour le suivi en continu des eaux de la nappe, ce projet compte seulement 5 piézomètres équipés, alors que le nombre recommandé est de 20-25 points de mesure par hectare (10 000 m²) *[CAIRNEY et HOBSON, 1998].* L'instrumentation d'un site avec ces exigences serait excessivement coûteuse. Avec mois de points de mesure, les informations manquantes doivent donc être complétées en utilisant d'une part un modèle quantitatif de transport de polluant (utilisation de Feflow ©) et d'autre part l'acquisition et la valorisation d'une base de connaissances qualitative sur l'évolution des sites charbonniers. Cette dernière est intégrée dans un synoptique en temps réel de restitution et d'aide à la décision.

L'ensemble du projet a impliqué la conception, mise en œuvre et réalisation d'un chantier complexe visant à fournir les preuves de la faisabilité de la mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué. Ce travail résulte de la collaboration des laboratoires SITE de l'ENSM-SE et du CNRSSP Douai dont les grandes phases et le bilan humain sur 5 ans avec Frédéric PORTET comme doctorant sont :

- de 1997 à mi-1998 : un chef de projet + un doctorant
  Méthodologie, sélection des analyseurs et caractérisation du site expérimental ;
- **de mi-1998 à mi-2000 : un doctorant comme chef de projet + un responsable "analyse"**
  Conception de l'instrumentation, réalisation sur site et mise en service des installations ;
- de mi 2000 à mi 2002 : un chef de projet + un doctorant
  Suivi du site et maintenance analyses et résultats.

Sans oublier l'assistance technique ponctuelle de l'ENSM-SE (3 personnes), du CNRSSP (2 à 3 personnes), du propriétaire du site (1 à 2 personnes), des entreprises de forage, d'électricité et de plomberie.

Ce chantier a mobilisé des technologies modernes (modèle numérique de terrain, SIG, GPS) et d'importants moyens matériels (environ 154 k€, soit 1 MF) autour d'un projet novateur, à ce jour unique en son genre au niveau national et international.

Conclusion sur l'expérimentation

Cette première expérience d'instrumentation et de suivi en temps réel de l'évolution d'une pollution cokière s'avère concluante en ce qui concerne l'analyse des biogaz et des paramètres généraux. Les dispositifs imaginés, puis mis en œuvre sur le site, ont été bien conçus et adaptés aux conditions difficiles notamment vis à vis du vandalisme. La représentativité temporelle des mesures est garantie par le très faible pas de temps adopté : journalier, soit très inférieure aux fréquences d'évolution des phénomènes naturels dans les sols (zones saturée et non saturée).

Par contre l'expérimentation à mise en évidence les limites de la fluorimétrie UV sur site pour la mesure des HAP. En effet, cette technologie ne permet pas de mesures sélectives par composés. De plus, les conditions idéales de laboratoire sont difficilement transposables sur site, d'où l'impossibilité d'un fonctionnement autonome, condition indispensable pour un bon monitoring continu.

Enfin, le coût global relativement important (matériel et opérateurs) est fortement handicapant pour le développement de cette technique.

Recommandations pour un bon Monitoring Continu de Site Pollué

Cette première expérience de MCSP a permis d'établir les bases d'une méthodologie pour un bon monitoring continu de site pollué, dont les points essentiels peuvent se résumer comme suit :

- caractérisation du site (bibliographie, investigations, analyses, etc…)
- choix des paramètres à mesurer : gaz (e.g. suivi de la biodégradation éventuelle), eau (e.g. piézométrie, suivi de la pollution de la nappe), paramètres généraux (e.g. météorologiques) etc...;
- mise en place d'un modèle en vue d'établir et de prévoir l'évolution de la pollution dans le temps. Calage et validation du modèle par rapport aux mesures *in-situ* ;
- détermination des points de mesure (piézomètres, cannes de prélèvement de gaz, échantillonnage du sol, etc…)
- choix et tests (en laboratoire et *in situ*) des appareils de mesure (analyseurs, automate, modem, centrale d'acquisition, dispositifs de prélèvement, etc…) ;
- réalisation du chantier : mise en place de l'ensemble du dispositif avec, si nécessaire, des mesures particulières de protection contre la malveillance et les intempéries (bungalow béton, conduites enterrées, etc…) ;
- mise en route du suivi : détermination et optimisation des protocoles d'acquisition (fréquences, durées, purges, etc…) et de la maintenance ;
- traitement, restitution et interprétation des données acquises pour une aide à la décision dans la gestion du site et par extrapolation à d'autres sites similaires.

Dans la conception de l'instrumentation, il faut rechercher la simplicité pour une maintenance minimum (stabilité de fonctionnement) tout en garantissant une précision acceptable. La démarche générale à adopter doit donc conjuguer des compétences contradictoires : l'analyse de laboratoire et les procédés industriels. De l'homogénéité de l'association des ces deux domaines dépendra la qualité finale du monitoring. Par exemple, les boucles de prélèvements de l'échantillon (domaine industriel) doivent être parfaitement compatibles avec l'analyseur (domaine analyse). De même, dans un souci de maîtrise des coûts, les fournitures et standards industriels (e.g. qualité alimentaire) sont à préférer par rapports aux matériels de laboratoires (pompes, plomberie, etc…). Enfin, pour le pilotage et la télémaintenance, les centrales d'acquisition et les automates doivent être équipés d'une interface de communication simple, accessible et autonome (utilisation des technologies Internet combinées avec la téléphonie mobile).

Apports et perspectives du MCSP

La faisabilité d'un MCSP a été démontrée et quelques aspects de la mise en place d'une méthodologie viable ont été prospectés. Les premiers résultats du MCSP appliqué à la friche expérimentale ont déjà permis de mettre en évidence l'impact de la variabilité des paramètres extérieurs sur les polluants. Par exemple, la dépendance de l'activité de biodégradation avec la température de l'air et donc des saisons (forte en été, faible en hiver). Autre exemple, la mise en évidence d'une forte variation de la piézométrie annuelle (mesures régulières mais non automatisées dans notre cas) qui modifie énormément les directions du transport des polluants (inversion des écoulements).

Ces résultats confirment l'intérêt des analyses en continu pour la mise en évidence :

- de phénomènes difficilement quantifiables avec des mesures ponctuelles (e.g. fonctionnement hydraulique) ;
- d'indicateurs pertinents et représentatifs d'un type de fonctionnement (e.g. influence de la température sur la biodégradation naturelle).

Cette expérimentation montre bien la non-représentativité des mesures ponctuelles généralement pratiquées pour le suivi des sites pollués "à surveiller". Toutefois, l'instrumentation d'un site pilote comme celui-ci, complétée d'un suivi continu de son évolution, permet l'identification de paramètres clés représentatifs de son fonctionnement. Cette connaissance est capitale car elle autorise une généralisation à d'autres sites similaires : la mesure d'un paramètre clé renseigne sur l'évolution profonde du site, aspect d'autant plus intéressant si le paramètre est facilement mesurable comme une température, une pluviométrie ou une piézométrie. Il est ainsi possible d'imaginer la capitalisation de ces enseignements sous la forme d'un guide de recommandations pour la surveillance de sites (cokiers dans notre cas).

Sur le plan technique, le travail réalisé sur ce MCSP et les acquis d'expériences qui en résultent apporteront une aide précieuse lors de l'instrumentation de futurs sites pollués, qu'il s'agisse d'hydrocarbures où d'autres polluants, comme les nitrates, phosphates, etc… En effet, la technologie utilisée ici peut parfaitement s'extrapoler à des problématiques et des domaines différents comme les pollutions agricoles, industrielles, etc… Toutefois dans le cas des HAP, il faut repenser le système d'analyse dans sa globalité avec pour objectifs une mesure sélective et stable. Les perspectives de recherche dans ce domaine doivent s'orienter vers un nouvel analyseur associé à un dispositif de prélèvement adapté. Pour la mise au point de ce nouveau système, il est envisageable de réutiliser le local d'analyse (transportable sur d'autres sites) comme laboratoire expérimental.

En ce qui concerne les fréquences d'analyses, il faut s'imposer le cas le plus défavorable, c'est à dire un pas journalier. Cela impose de bien penser et dimensionner les installations pour ne pas induire d'encrassement, d'usure prématurée des appareillages ou de saturations des mémoires. Si l'information ainsi recueillie est surabondante pour d'écrire les phénomènes naturels dans les sols (saturé et non saturé), cela permet un bon suivi du fonctionnement de l'instrumentation (détection rapide des dysfonctionnements indispensable à la qualité du monitoring continu) et autorise de nouvelles perspectives plus contraignantes (e.g. supervision de la dépollution). En effet, dans le cas d'une dépollution d'un site pollué équipé d'un monitoring continu, il est envisageable d'utiliser les instruments de mesure pour quantifier l'impact d'un traitement et, par conséquent, d'optimiser les processus de dépollution : connaissances capitalisables pour d'autres sites similaires à dépolluer.

Un MCSP peut s'avérer être un outil performant d'aide à la décision. En effet, couplé à un outil de modélisation hydrodispersifs et en se basant sur les enseignements issus des observations, il peut calculer plusieurs scénarii d'évolution en fonction des hypothèses les plus probables. La confrontation avec une base d'objectifs guidera le gestionnaire quant aux actions à entreprendre ou pas. Parmi les différentes possibilités, le Monitoring peut montrer la prédominance de la biodégradation naturelle sur l'expansion de la pollution. Il est donc possible d'imaginer la prise en compte de l'atténuation naturelle comme méthode de gestion des sites et sols pollués, sous réserve de la mise en place d'une surveillance automatisée. Cette nouvelle perspective pourrait contribuer à l'essor du MCSP.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE (ADEME). Qualité de l'Air. Angers : Guide pratique, informations citoyens ADEME, 2002, 20p.

AKIMA H., 1970. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. *J.ACM*, vol. 17, no. 4, pp. 589-602

BARBE Pascal. Etude du comportement des HAP sur d'anciens sites d'activité de la pyrolyse du charbon. Douai (FR) : CNRSSP, 1997. 95p + Annexes. Rapport CNRSSP n° 97/04.

BERTRAND-KRAJEWSKI Jean-Luc. LA PLUIE : MESURE ET MODELISATION. Cours d'Hydrologie Urbaine, Partie 2. URGC INSA de Lyon, Lyon, 2002. 69p.

BOUCHEZ, M; BLANCHET, D.; HAESELER, F. et VANDECASTEELE, J.-P. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement. 1ère partie : propriétés, origines, devenir, Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 51, N°3, 407-419; 1996.

BRANCHU Philippe. Contrôle et suivi de sites pollués ou en cours de traitement : Etat de l'art sur les analyseurs. Douai (FR) : CNRSSP, 1997. 101p + Annexes. Rapport CNRSSP n° 97/16.

BUREAU DE RECHERCHE GEOLOGIQUE ET MINIERE; Carte géologique St.-Amand Crespin Mons. Orléans : BRGM Edition, 1973, carte + notice explicative 16p.

BUREAU DE RECHERCHE GEOLOGIQUE ET MINIERE; Guide du comportement des Carte géologique St.-Amand Crespin Mons. Orléans : BRGM Edition, 1973, carte + notice explicative 16p.

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES. *Guide d'utilisation du classeur des sites (potentiellement) pollués, version 1*. Orléans : BRGM, 1998. Rapport BRGM R 39903.

CAIRNEY T, HOBSON D.M. Contaminated land: Problems and Solutions. London : E and FN SPON, 1998. 369p..

CAMPBELL M. (1997). Sensor systems for environmental monitoring. Volume one : Sensor technologies. Blackie Academic and Professional, London, 309 p.

CAMPBELL M. (1997). Sensor systems for environmental monitoring. Volume two : Environmental monitoring. Blackie Academic and Professional, London, 359 p.

CHARBONNAGE DE FRANCE. *Le charbon :* (2 livrets) matière énergétique (28p), ses techniques d'utilisation (28p). Nanterre : Charbonnage de France, 1988.

CRONE Magali. Diagnostic de sols pollués par des HAP à l'aide de la spectrophotométrie UV. Thèse soutenue le 28 janvier 2000.Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2000. 166p.

DARMENDRAIL Dominique. *Etude des sols. Evaluation simplifiée des risques*. Paris : Techniques de l'Ingénieur, traité environnement G 2 590, 1999, 6p.

DERVIN Thierry. Caractérisation du spectre géochimique naturel de la région Nord/Pas-de-Calais autour de sites industriels liés à l'industrie charbonnière. Douai (FR) : CNRSSP, 1998. 56p + Annexes. Rapport CNRSSP n° 98/20.

DIERSCH, H.-J. Interactive, graphics-based finite-element simulation system FEFLOW for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes. User's Manual Release 4.7, may 1998, WASY Ltd., Berlin

DIERSCH, H.-J., 1996. Finite element analysis of three-dimensional transient free convection processes in porous media, In: Computation of Three-Dimensional Complex Flows, (Proc. IMACS-COST Conf. Lausanne, September 13-15, Switzerland, 1995), ed. By M. Deville and al., Notes on Numerical Fluid Mechanics vol. 53, Vieweg and Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 38-44

DIERSCH, H.-J., ALBERT, H., SCHREYER, J., RICHTER, J., 1995. Three-dimensional modeling of flow and contaminant transport processes arising in flooding the Königstein uranium pit. In: B. Merkel and al. (eds): Proc. Intern. Conf. Uranium-Mining and Hydrogeology, Verlag Sven von Loga, Köln, 121-130

DUMON Roger. LE RENOUVEAU DU CHARBON. LES OBECTIFS SCIENTIFIQUES DE DEMAIN. Paris : MASSON, 1981.216 p.

FERRETI Marc. *LA VALORISATION DU CHARBON, gazéification, liquéfaction, carbochimie.* Technique et documentation. Paris : Lavoisier, 1982. 318 p.

GUSTAFSON J. B., TELL J. G., OREM D., 1997, "Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations", Amherst Scientific Publishers, 102 p.

HERMINE Jean-Philippe. *Sites pollués : contamination des sols et des nappes phréatiques*. Paris : Techniques de l'Ingénieur, traité environnement G 500, 2000, 3p.

HILLEWAERE Jean-Pierre. *Cadre réglementaire de la pollution des sols*. Paris : Techniques de l'Ingénieur, traité génie industriel G 2 520, 1998, 14p.

Hollande Norme hollandaise présentée dans STRUILLOU (1996). 1994.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS). PLQ2000, stations d'acquisitions de données. Verneuil : plaquette INERIS, 2002, 6p.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS). Projet TRANSPOL. Intercomparaison et validation des codes de transport de polluants – Cas réel n°1 : CR1 version 1.0 – Etude d'une pollution par des HAP : présentation des données et cahier des charges de la modélisation. Juillet 1999, INERIS DRS-99-20640/R07.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS). FICHE DE DONNEES TOXICOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DES SUBSTANCES CHIMIQUES. 2003. http://www.ineris.fr/recherches/fiches/fiches.htm

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS). Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques – Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Rapport final. 18 décembre 2003 INERIS DRC-03-47026-ETSC-DBo.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS). Dossier ERIKA. 7 rapports. Mars 2000. http://www.ineris.fr/actualites/erika1/erika1.htm

KARICKOFF S.W., Brown D.S., Scott T.A. Sorption of Hydrophobic Pollutants on Natural Sediments, Wat. Res. Res., 13, 241-248. 1979.

LECOMTE Paul. Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. Paris : Technique et Documentation Lavoisier, 1995. 198p.

LIDE D. R., 1997, "Handbook of Chemistry and Physics", CRC Press Boca Raton, NY.

LOISON Roger. *LA GAZEIFICATION DES COMBUSTIBLES SOLIDES*. CAHIER DE L'UTILISATION DU CHARBON (CODETEC et CERCHAR) vol 6. Paris : Technip, 1983. 79 p.

MICHEL Karine, BUREAU Bruno, BOUSSARD-PLEDEL Catherine, ADAM Jean-Luc, LOUVRIER Martine. Détection in situ des polluants des eaux et des sols par fibre optique infrarouge. Première rencontre Nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. 12-13 décembre 2003. Ademe. Paris. Fr.

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *BASIAS : Inventaire des Anciens Sites Industriels et Activités de Service*. Disponible sur <http://basias.brgm.fr/> (consulté le 10 juin 2002).

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *BASOL : base de sonnées des sites et sols pollués appelant une action des pouvoirs publics*. Disponible sur <http://basol.environnement.gouv.fr/> (consulté le 10 juin 2002).

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. Classeur "*Gestion des sites (potentiellement) pollués". La politique nationale en matière de traitement et de réhabilitation des sites et sols pollués : le pré-diagnostic, le diagnostic initial (étude des sols), la méthode nationale d'évaluation simplifiée des risques - Mise à jour juin 1997, version 1.* Orléans : BRGM Editions, 1997, 500p env.

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. Classeur "*Gestion des sites (potentiellement) pollués". La visite préliminaire, le diagnostic initial, l'évaluation simplifiée des risques. Version 2*. Orléans : BRGM Editions, 2000, 726p + 2 disquettes.

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. Guide du comportement des polluants dans le sol et les nappes. Orléans : BRGM Editions, 2001, 121p..

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *Recensement 1996 des sites et sols pollués*. Paris : MATE, DPPR Service de l'Aménagement Industriel, 1997, 430p.

OMS IPCS (1998) - Environmental Health Criteria n°202: Polycyclic aromatic hydrocarbons. World Health Organisation, International Programme on chemical Safety. http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc202.htm

PELLET. Polluants organiques courants : caractéristiques physico-chimiques et comportement dans le milieu naturel. Rapport ANTEA A 00495, Juin 1994.

Project IMSIS : In situ monitoring of landfill related contaminants in soil and water by infrared sensing. http://www.ipm.fhg.de/english/fields/pp_monitoring/process/fluid/imsis.html

PULS R.W., POWELL R.M., CLARK D.A., PAUL C.J., 1991. Facilitated transport of inorganic contaminants in ground water. Part 2. Colloidal transport. Rapport EPA/600/M-91/040, 12p.

STEYER Emmanuel, BELKESSAM Laurence, LABOUDIGUE Agnès, DENGIS Pierre, DARDENNE Pierre, COPIN Alfred. Utilisation de techniques de mesure sur site pour le diagnostic rapide d'une pollution en HAP sur d'anciens sites de la carbochimie. Première rencontre Nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. 12-13 décembre 2003. Ademe. Paris. Fr.

STEYER Emmanuel. La caractérisation *in situ* de sites issus d'activités liées au charbon. Amélioration et applicabilité en vraie grandeur de tests rapides de terrain. Etat de l'art des technologies permettant la détection des HAP et des BTEX. Douai (FR) : CNRSSP, 1999. 113p + Annexes. Rapport CNRSSP n° 99/30.

STRUILLOU R. (1996). Problématique de la réhabilitation des sites et sols pollués. Ecole Polytechnique de Fédérale de Lausanne. 1996. 122p.

SZAFNICKI K., GRAILLOT D. (1996). Knowledge-based Real-time Fault Detection and Supervision of Urban Drainage Systems. *Automatica*, Vol.32, N°7.

SZCZEPSKI Céline. Etude de la répartition de polluants organiques (HAP) au sein d'une maille d'échantillonnage de sols. Douai (FR) : CNRSSP, 2000. 54p + annexes. Rapport CNRSSP n°00/12.

TEISSIE Jean, DE BOURGUES Diégo, BAUTIN François. Le Charbon. Rapport TotalFinaElf, 2001. 28p. http://sfp.in2p3.fr/débat/debat_energie/websfp/LE%20charbon.html

TIFFON Georges. LE CHARBON. Que sais-je. Paris : presses universitaires de France.

VAN DORPE François FEFLOW 4.8. Guide d'utilisation – version 1. Douai (FR) : CNRSSP, 2000. 72 p + annexes. Rapport CNRSSP/00/13.

VAN DORPE François Modélisation du transport de HAP par FEFLOW dans le cadre du projet TRANSPOL "Intercomparaison et validation des codes de transport des polluants". Douai (FR) : CNRSSP, 2000. 9 p + annexes. Rapport CNRSSP/00/11.

WAVRER Philippe. Ancienne cokerie du site X - Compte rendu de la campagne d'échantillonnage. Douai (FR) : CNRSSP, 1997. 13 p + annexes. Rapport CNRSSP/97/08.

WAVRER Philippe. Echantillonnage de sites contaminés par des polluants organiques - Comparaison de différentes stratégies et outils. Douai (FR) : CNRSSP, 1998. 45 p + annexes. Rapport CNRSSP 98/27.

ANNEXES

Toxicité des HAP

Annexe 1

Origine : OMS 1998

INERIS 2000/2003

2003

Toxicocinétique

Les HAP sont absorbés au niveau des poumons, des voies digestives et par la voie percutanée. Après absorption cutanée, ils parviennent jusqu'au poumon où ils se lient à l'ADN. Chez la souris, la vitesse d'absorption dépend du composé. Quelle que soit la voie d'administration, les HAP se répartissent dans tout l'organisme et sont retrouvés dans pratiquement tous les organes internes, mais plus particulièrement dans ceux qui sont riches en lipides. Après injection intraveineuse à des rongeurs, les HAP sont rapidement éliminés du courant sanguin, mais ils sont capables de traverser la barrière foetoplacentaire et ont été décelés dans les tissus foetaux. Les HAP ont un métabolisme complexe. La plupart du temps, la métabolisation d'un HAP entraîne sa détoxication, mais certains d'entre eux subissent une activation en composés susceptibles de se lier à l'ADN, principalement des époxydes et des diols, qui sont capables d'amorcer un processus de cancérisation. La peau est un lieu de métabolisation particulièrement actif des HAP. Les HAP ne s'accumulent pas dans l'organisme.

Données animales

- Toxicité systémique

La toxicité aiguë des HAP varie de faible à modérée. Un HAP bien caractérisé, le naphtalène, a donné des valeurs de DL50 (Dose Létale 50) par voie orale ou intraveineuse égales à 100-500 mg/kg chez la souris. Des effets respiratoires (nasaux et pulmonaires) consécutifs à une exposition de courte durée au naphtalène (1h et 4h à des concentrations de l'ordre de 400 mg/m3) ont été décrits. L'US EPA retient comme effet critique par voie orale, à des doses de l'ordre de 100 mg/kg en exposition chronique, une nécrose cellulaire pour le naphtalène, l'acénaphtène, l'anthracène, le fluoranthène et le fluoréne (voir liste complète des valeurs de référence en annexe B, rapport n° 6). Une seule concentration de référence pour une exposition par voie pulmonaire a été fixée (à 3µg /m3 pour le naphtalène). Les effets cutanés ont été largement étudiés. Les HAP faiblement ou non cancérogènes comme le pérylène, le benzo(e)pyrène, le phénanthrène, le pyrène, l'anthracène, l'acénaphtène, le fluorène et le fluoranthène étaient inactifs, alors que les HAP cancérigènes comme le benzo(a)anthracène, le dibenzo(a,h)anthracène et le benzo(a)pyrène provoquent une hyperkératose. Les vapeurs d'anthracène et de naphtalène peuvent causer une légère irritation oculaire. Le benzo(a)pyrène provoque une hypersensibilité de contact chez des cobayes et des souris. L'anthracène, le phénanthrène et le benzo(a)pyrène sont phototoxiques pour la peau des mammifères ou les cultures cellulaires in vitro lorsqu'on les applique sous rayonnement ultraviolet.

D'une façon générale, on considère que les HAP ont un effet immunodépresseur. Après administration de benzo(a)pyrène à des souris, on a observé une forte immunodépression dans la descendance de ces animaux pendant une période pouvant atteindre 18 mois. On a également constaté un accroissement de la régénération du tissu hépatique et une augmentation du poids du foie.

- Toxicité pour la reproduction

Le benzo(a)anthracène, le benzo(a)pyrène, le dibenzo(a,h)anthracène et le naphtalène se sont révélés embryotoxiques chez la souris et le benzo(a)pyrène a également des effets tératogènes et sur la reproduction. Chez le lapin et la souris, il a une activité transplacentaire qui se traduit par des adénomes pulmonaires et des papillomes cutanés dans la descendance des animaux traités. On a également observé une diminution de la fécondité et la destruction des ovocytes.

- Génotoxicité

De nombreuses études ont été menées pour évaluer la génotoxicité des HAP et sur leur aptitude à provoquer un transformation cellulaire. Les HAP pour lesquels les résultats sont toujours négatifs sont l'anthracène, le fluorène et le naphtalène. Dans le cas du phénanthrène et du pyrène, l'irrégularité des résultats ne permet pas de se prononcer avec certitude sur leur génotoxicité. L'IPCS classe 26 HAP sur 33 comme cancérogènes ou soupçonnés de l'être. Le mieux connu est le benzo(a)pyrène qui a été étudié par toutes les méthodes existantes sur sept espèces. De nombreux HAP sont cancérogènes pour l'animal et pourraient également l'être pour l'homme. Ces composés font apparaître des tumeurs non seulement au point de contact, mais aussi à distance de ce point. Le pouvoir cancérogène peut varier avec la voie d'administration.

Effets sur l'homme

L'application cutanée d'anthracène, de fluoranthène, et de phénanthrène provoque des réactions cutanées spécifiques et le benzo(a)pyrène donne naissance à des verrues régressives et réversibles, classées comme étant de nature néoplasique. Les projections cutanées peuvent être suivies d'une légère irritation. Le contact oculaire avec la substance solide peut entraîner une conjonctivite et des lésions du type kératite superficielle.

C'est en 1775 que l'on a, pour la première fois, avancé que l'exposition professionnelle à la suie était une cause de cancer du scrotum. Par la suite, on a remarqué que l'exposition aux goudrons et aux paraffines provoquait des cancers de la peau. Le poumon est désormais la principale localisation des cancers dus aux HAP, les cancers cutanés étant devenus plus rares par suite des progrès de l'hygiène individuelle.

Les enquêtes épidémiologiques sur l'exposition aux HAP montrent un excès de cancers pulmonaires chez des ouvriers de fours à coke, chez les ouvriers d'ateliers de préparation de l'asphalte, chez les ouvriers de l'industrie de réduction électrolytique de l'alumine par le procédé Söderberg. Dans l'industrie de l'aluminium, on observe en plus des cancers de la vessie et des symptômes asthmatiformes, des anomalies de la fonction pulmonaire et des bronchites chroniques. Une étude montre chez les ouvriers exposés à la créosote un excès de cancers de la peau. Chez les ouvriers des fours à coke, on a noté une diminution des taux d'immunoglobulines sériques et une dépression des fonctions immunitaires.

Il existe, en France, deux tableaux de maladies professionnelles en relation avec les expositions aux HAP :

- 16 bis : épithéliomas primitifs de la peau, cancers broncho-pulmonaires primitifs et tumeurs malignes et bénignes de la vessie pour une liste limitative de travaux comportant une exposition aux goudrons de houille, aux brais de houille et aux suies de charbon.

- 36 bis : épithéliomas primitifs de la peau pour une liste limitative de travaux entraînant l'exposition à certains dérivés du pétrole (extraits aromatiques, huiles minérales utilisées à haute température dans les opérations d'usinage et de traitement des métaux, suie de combustion des produits pétroliers).

Concentrations environnementales

Les HAP sont des polluants ubiquitaires présents dans l'alimentation, les sols, l'eau et l'air extérieur et l'air intérieur.

Les ordres de grandeurs des concentrations relevées dans l'atmosphère sont les suivants :

- ✓ en milieu professionnel : plusieurs milliers de ng/m3
- ✓ autour des installations industrielles : jusqu'à plusieurs centaines de ng/m3 par HAP
- ✓ en ville : quelques dizaines de ng/m3 par HAP
- ✓ dans les tunnels : 1 à 50 ng/ m3
- ✓ à la campagne : quelques ng/m3

Propriétés des HAP

Annexe 2

Origine : rapport CNRSSP 97/04

Avril 1997

Produit	Solubilité autre que dans l'eau	Stabilité	Réactivité
Naphtalène	alcool éthylique, éther, acétone, benzène		
Acénaphtylène	alcool éthylique, éther, benzène		
Acénaphtène	alcool éthylique, benzène		
Fluorène	à chaud dans l'acide acétique, l'acétone, le benzène, le disulphure de carbone, le tétrachlorure de carbone, le diéthyl éther, l'éthanol, la solution de pyrimidine et le toluène		réactions de Friedel-Crafts; réaction d'hydrogénation, de déshydrogénation, de nitration et d'oxydation : réaction avec l'oxygène pour former un hydropéroxyde; réaction avec NO_2 pour former des dérivés nitrés.
Anthracène	benzène, disulphure de carbone, tétrachlorure de carbone, chloroforme, diéthyl éther, éthanol, méthanol et toluène	réactions de photo-oxydation et photodécomposition	nombreuses réactions d'addition et de substitution avec Cl_2 et Br_2
Phénanthrène	acide acétique glacial, benzène, disulphure de carbone, tétrachlorure de carbone, diéthyl éther anhydre, l'éthanol et le toluène		réactions d'hydrogénation, de nitration, de sulphonation et d'halogénation; réaction avec les NOx pour former des dérivés nitrés
Fluoranthène	acide acétique, benzène, disulphure de carbone, chloroforme, diéthyl éther et éthanol		réactions de chloration, bromation, nitration; réactions de Friedel-Crafts; réactions avec les NOx pour former des dérivés nitrés
Pyrène	benzène, disulphure de carbone, diéthyl éther, éthanol, éther de pétrole, toluène et acétone	aucune réaction de photo-oxydation dans des solvants organiques	réaction avec les oxydes d'azote pour former des dérivées nitrés
Benzo(a)anthracène	légèrement soluble dans l'acide acétique; soluble dans l'acétone et le diéthyl éther; très soluble dans le benzène		réaction de Diels-Alder, hydrogénation catalytique; oxydation par le dichromate de sodium et le tétroxyde d'osmium; réaction avec les NOx pour former des dérivés nitrés
Chrysène	légèrement soluble dans l'acétone, le disulphure de carbone, le diéthyl éther, l'éthanol, l'acide acétique glacial, le toluène et le xylène à chaud; soluble dans le benzène		oxydé par le tétroxyde d'osmium; réaction avec les NOx pour former des dérivés nitrés
Benzo(a)pyrène	modérément soluble dans l'éthanol et le méthanol	réactions de photo-oxydation	oxydation avec l'ozone; réactions de nitration et d'halogénation; réaction avec les oxydes d'azote pour former des dérivés nitrés
Benzo(b)fluoranthène	légèrement soluble dans le benzène et l'acétone		
Dibenz(a,h)anthracène	benzène, toluène, xylène et la plupart des solvants organiques et huiles	réactions de photo-oxydation en solution	hydrogénation en dérivées octadecahydro oxydé par l'acide chromique et le tétroxyde d'osmium
Benzo(k)fluoranthène	acide acétique, benzène et éthanol		oxydation en quinone et produit méthylé
Benzo(g,h,i)pérylène	1,4-dioxane, benzène et acétone		réaction avec les NOx pour former des dérivés nitrés
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	soluble dans les solvants organiques		

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques
- les 16 HAP de la liste de l'EPA -
(solubilité, stabilité, réactivité)

Produit	Solubilité dans l'eau seuil (mg/l) à 25 °C	Densité des liquides (eau = 1)	Densité des vapeurs (air = 1)	Pression de vapeur saturante (Pa) Pv^T	Point d'ébu. (°C) 1 atm	Constante de Henry $Pa.m^3/mol$ ou sans dim.*	Partage CO/eau logKoc	Partage oct./eau log Kow	Viscosité dyn. à 25 °C cP
Naphtalène	32 ([f,s]) 30 à 20 °C ([a,v]) 31,7 ([z])	1,162 $^{20/4}$ ([a])	4, 40 ([a])	7^{20} ([a]) 2,8 ^{10} ([a]) 6,56 ([q]) 31,2 ([j])	218 ([a])	49,00 ([b]) 1,98E-2 ([j]) sans dim.	3,11 ([c]) 3,74 ([h]) 3,29 ([ae])	3,20 ([d,ad]) 3,35 ([f]) 3,40 ([aa,ab,ac]) 3,36 ([s]) 3,31 ([z]) 3,47 ± 0,19 ([i])	0,78 ([e]) 0,3 ([l])
Acénaphtylène	3,93 ([f]) 3,47 ([k])	$0,8988^{16/2}$ ([b]) 1,1940 ([j])		2,6 ([k]) 3,8 ([j]) 2,67 ([q,k]) $3,87^{20}$ ([y])	265 - 275 ([b]) 265 ([j])	6,1E-2 ([j]) sans dim.		4,33 ([k]) 4,03 ([j]) 4,07 ([m,y])	0,3 ([l])
Acénaphtène	3,42 ([f]) 3,47 ([y])	$1,0242^{20/4}$ ([b])		2,67 ^{20} ([y])	279 ([b])			3,92 ([f]) 4,33 ([y])	
Fluorène	1,9 ([f]) 1,98 ([q,w,y])	1,203 ([j])		98^{146} (10 mm à 146 °C) ([b]) $1,73^{20}$ ([j,q,y])	295 ([b]) 294 ([f])	4,8E-2 ([j]) sans dim.	4,68 ([h])	4,18 ([f,j,q,y]) 4,32 ± 0,19 ([i]) 4,20 ([r])	0,3 ([l])
Anthracène	0,07 ([f]) 0,073 ([q,z])	1,24 ([d]) 1,283 ([m])		133^{145} ([b]) 0,026 ([j,q])	340 ([b]) 342 ([u])	8,71 ([e]) 4,04E-3 ([j]) sans dim.	4,15 ([c]) 4,65 ([h]) 4,41 ([z]) 4,2 ([af])	4,54 ([d]) 5,54 ([f]) 4,48 ([aa,ab]) 4,45 ([j,q,v]) 4,34 ([z]) 4,53 ± 0,19 ([i])	0,3 ([l])
Phénanthrène	1,0 ([f]) 0,95 à 20 °C ([d]) 1,29 ([q,z])	1,172 ([d]) 1,179 ([u])		133^{118} ([b]) $0,091^{20}$ ([j,q,r])	340 ([b]) 338 ([f])	13,17 ([e])	4,15 ([c]) 4,65 ([h]) 4,36 ([z]) 4,42 ([ae])	4,43 ([d]) 4,52 ([f,z]) 4,46 ([ab,j,q,v,y,ad]) 4,48 ± 0,19 ([i])	0,3 ([l])
Fluoranthène	0,265 ([d]) 0,26 ([y])	1,236 ([d]) 1,252 ([j])		8E-4^{20} ([e,j,y])	384 ([d]) 383 ([f])	0,66 ([e]) 2,6E-4 ([j]) sans dimen.	4,58 ([c])	5,30 ([e]) 5,22 ([f]) 5,33 ([y])	0,3 ([l])
Pyrène	0,032 ([d]) 0,16 ([f]) 0,135 ([q,y])	1,271 ([d])		8E-5^{20} ([e]) 9,13E-5^{20} ([j,y])	393 ([d])	0,52 ([e]) 4,5E-3 ([j]) sans dimen.	4,58 ([c]) 4,80 ([y])	4,88 ([d]) 5,18 ([f]) 4,84 ± 0,19 ([i])	0,3 ([l])
Benzo(a)anthracène	0,014 ([g,y]) 0,0057 ([f]) 0,0094 ([p])	1,174 ([j])		6,67E-7^{20} ([j,y])	435 ([f])	4,5E-6 ([j]) sans dimension	5,62 ([h])	5,54 ([i]) 5,61 ([y]) 5,54 ± 0,19 ([i])	0,3 ([l])
Chrysène	0,0022 ([g]) 0,0018([q]) 0,0015 ([v]) 0,06 ([f]) 0,002 ([y])	1,274 ([u])		8,4E-5^{20} ([j,q,y])	448 ([b]) 441 ([f])	3,9E-3 ([j]) sans dim.		5,79 ([f]) 5,61 ([q,y]) 5,91 ([l])	0,3 ([l])
Benzo(a)pyrène	0,0045 à 20 °C ([d]) 0,0038 ([y])	1,282 ([d]) 1,351 ([a])		7E-5^{20} ([e]) 7,3E-7 ([a]) 6,67E-7^{20} ([j,y])	496 ([d]) 475 ([a])	0,05 ([e]) 1,8E-5 ([j]) sans dim. 1,5E-6 ([r]) sans dim.	6,74 ([c]) 6,27 ([h])	6,15 ([d]) 6,02 ± 0,19 ([i]) 6,04 ([y])	0,3 ([l])
Benzo(b)fluoranthène	0,001 ([j]) 0,0012 ([q,y])			6,67E-5^{20} ([j,q,r,y])	481 ([j])	6,9E-3 ([j]) sans dim.		6,57 ([j,q,y]) 6,08 ([r])	0,3 ([l])
Dibenz(a,h)anthracène	0,0005 ([g,q]) 0,0025 ([j])	1,252 ([j])		1,33E-8^{20} ([j,r])	524 ([j])	6,1E-7 ([j]) sans dim. 2,6E-9 ([r]) sans dim.	6,44 ([h])	6,40 ([i]) 6,50 ([s, t]) 7,19 ([l])	0,3 ([l])
Benzo(k)fluoranthène	0,0008 ([q]) 0,0003 ([j])			6,67E-5 ([q]) 6,80E-5 ([r]) 1,28E-8 ([j])	480 ([e])	4,4E-6 ([j]) sans dim.		6,84 ([j]) 6,84 ([q]) 6,08 ([r])	0,3 ([l])
Benzo(g,h,i)pérylène	insoluble								
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0,0002 ([q]) 0,00014 ([j])			1,33E-8^{20} ([j])	340 ([j])	2,4E-8 ([j]) sans dim. 6,9E-8 ([r]) sans dim.		7,66 ([q]) 7,66 ([j]) 6,51 ([r])	0,3 ([l])

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques : caractéristiques physico-chimiques
On passe de l'expression sans dimension à l'expression avec dimension par multiplication par RT où R est la constante des gaz parfait.

Références du tableau

([a]) Fiches toxicologiques, INRS (Institut National de Recherche et Sécurité), 1992.

([b]) Handbook of Chemistry and Physics, 1992 - 1993, 73rd Edition - David R. Lide (eds), Ph. D. - CRC Press, Inc.

([c]) Mercer, J. W.; Skipp, D. C. et Giffin, D., 1990 - « Basics of pump-and treat ground-water remediation technology », EPA-600/8-90/003.

([d]) Kinzelbach, W., 1991 - « Sanierungvaerfahren für graundwasserschadensfälle und altlasten - anwendbarkeit und beurteilung », Deutscher verband für wasserwirtschaft und kulturbau - FachausshuB 3.3 : Grundwasserhydraulik und Modelle.

([e]) ESC 624 Organic Database.

([f]) Bouchez, M; Blanchet, D.; Haeseler, F. et Vandecasteele, J.-P. (1996) - « Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement. 1ère partie : propriétés, origines, devenir », Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 51, N°3, 407-419.

Bjorseth, A. (ed) 1983 - « Handbook of polycyclic aromatic hydrocarbons », Marcel Dekker. New York, Basel, 709-718.

Lee, L. S.; Rao, P. S. C. et Okuda, I. (1992) - « Equilibrium partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons from coal tar into water », Environ. Sci. Technol., 26, 2110-2115.

Peters, C. A. et Luthy, R. G. (1993) - « Coal tar dissolution in water-miscible solvents : experimental evaluation », Environ. Sci. Technol., 27, 2831-2843.

([g]) IARC Monographs on the evaluation on the carcinogenic risks of chemicals on humans, Vol. 32, part 1, 1983.

([h]) Nielsen, T.; Siigur, K.; Helweg, C.; Jorgensen, O.; Hansen, P.E. et Kirso, U. (1997) - « Sorption of Polycyclic Aromatic Compounds to Humic Acid as Studied by High-Performance Liquid Chromatography », Environ. Sci. Technol., 31, 1102-1108.

([i]) Helweg, C.; Nielsen, T. et Hansen, P.E., 1997- « Determination of octanol-water partition coefficients of polar polycyclic aromatic compounds (N-PAC) by high performance liquid chromatography », Chemosphere, 34 (8), 1673-1684.

([j]) EPRI - STF database

([k]) USEAP - STF database

([l]) Walters, R. W. - STF database

([m]) Montgomory, Welkom - STF database

([n]) MacKey, D. - STF database

([o]) MacKey, D. et al. - STF database

([p]) Neff - STF database

([q]) Environmental Research and Technology, Inc - STF database

([r]) MEPAS - STF database

([s]) Karickhoff, S. W. - STF database

([t]) Freitag et al. - STF database

([u]) Merck Index - STF database

([v]) Verschueren, R. - STF database

([w]) Hwang, S. T. - STF database

([x]) Mallon, Harrison - STF database

([y]) Environmental Protection Agency, 1979 - « Water-Related Environmental Fate of 129 Priority Pollutants », Contract N° 68-01-3852

([z]) Kenega, E.E and Goring, C.A.I., 1980 - « Relationship between water solubility, soil sorption, octanol-water partitioning, and concentration of chemical in biota », Special Technical Publication 707, American Society for Testing Materials.

([aa]) Sangster, J., 1989, J. Phys. Chem. Ref. Data, 18, 1111-1230

([ab]) Hansch, C. et Fujita, T., J. Amer. Chem. Soc., 1964, 86, 1616-1626

([ac]) Rapaport, R.A. et Eisenreich, S.J., 1984, Environ. Sci. Technol., 18, 163-170

([ad]) Verchueren, K., 1983, Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals, 2nd ed., van Nostrand Reinhold Co., New York

([ae]) Wood, A.L.; Bouchard, D.C.; Brusseau, M.L. et Rao, P.S.C., 1990 - « Cosolvent effects on sorption and mobility of organic contaminants in soils », Chemosphere, 21 (4-5), 575-587.

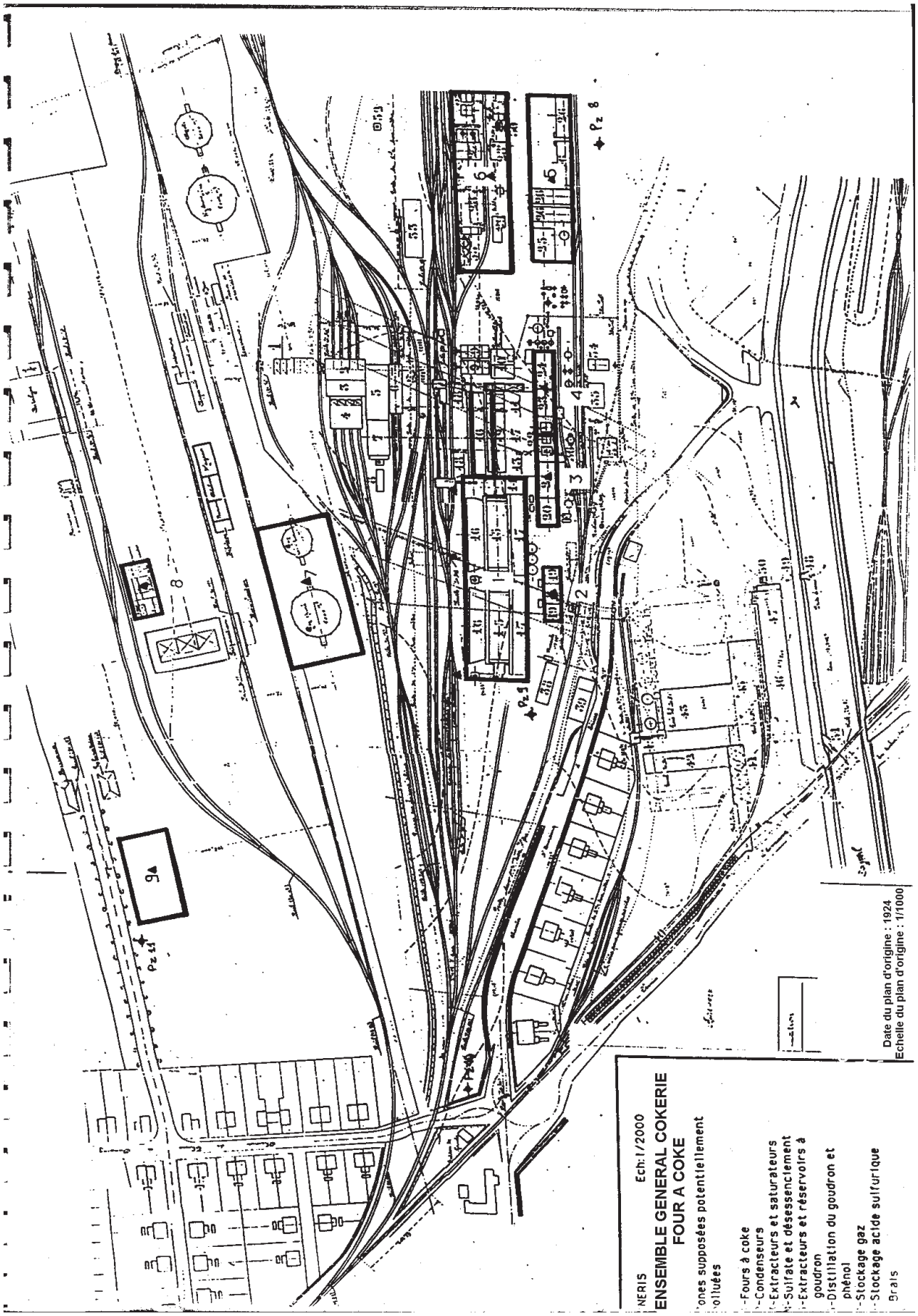
([af]) Nikedi-Kizza, P.; Rao, P.S.C. et Hornsby, A.G., 1985 - « Influence of organic cosolvents on sorption of hydrophobic organic chemicals by soils », Environ. Sci. Technol., 19, 975-979.

Four à coke - Cokerie - Ensemble général

Annexe 3

Origine : plan du 9 août 1924

Août 1924


NERIS
Ech: 1/2000
ENSEMBLE GENERAL COKERIE
FOUR A COKE
ones supposées potentiellement
olluées
-Fours à coke
-Condenseurs
-Extracteurs et saturateurs
-Sulfate et désessenciement
-Extracteurs et réservoirs à goudron
-Distillation du goudron et phénol
-Stockage gaz
-Stockage acide sulfurique
Brais
Date du plan d'origine : 1924
Echelle du plan d'origine : 1/1000

Implantation et description des piézomètres

Annexe 4

Origine : INERIS/CNRSSP

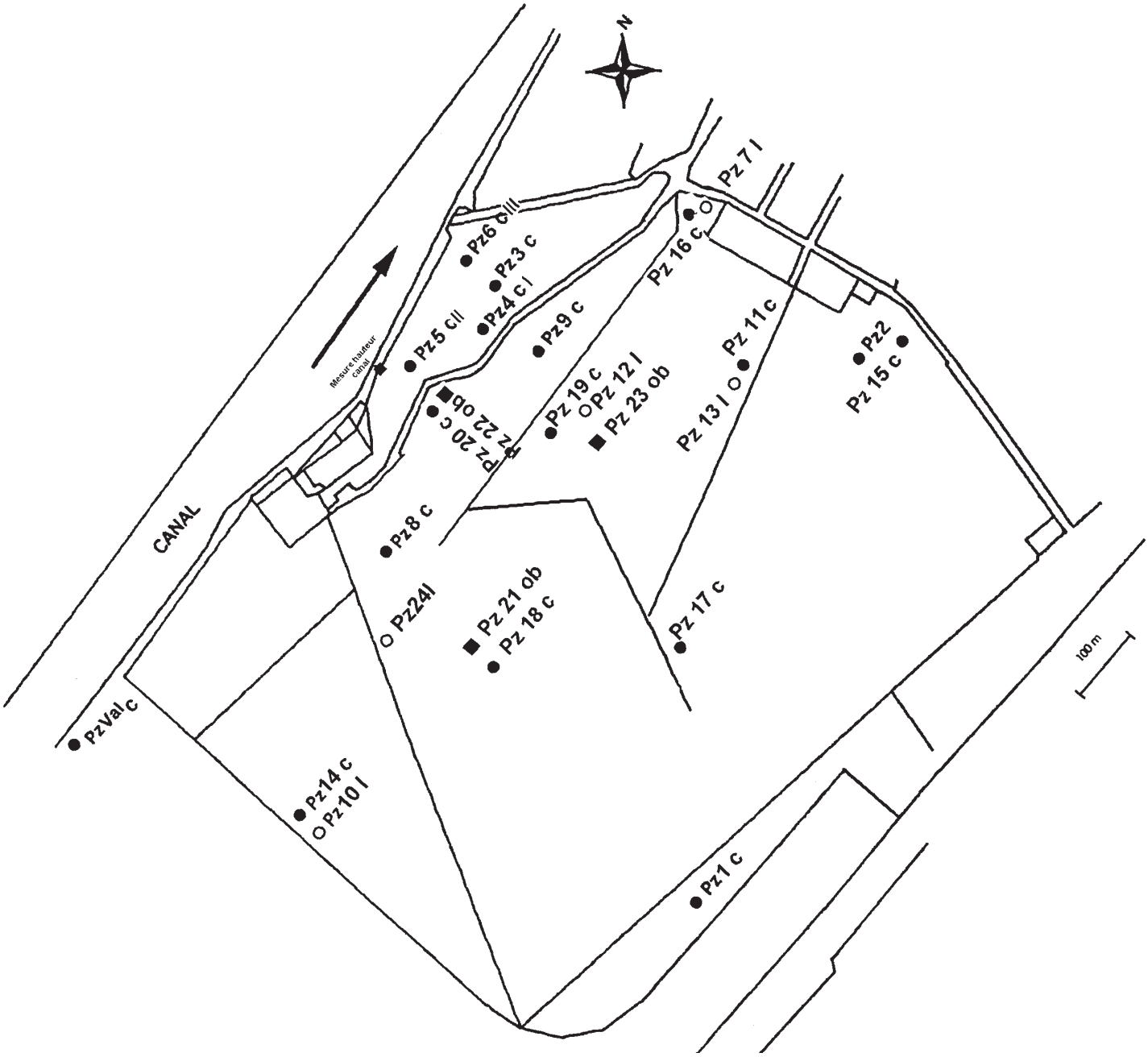
2001

Implantation des piézomètres

- ● Piézo court grave
- ○ Piézo long craie
- ■ Piézo d'observation

- ● Pz1, Pz2 et Pz3 BRGM 1992 Nappe superficielle (détruits) ;
- ● Pz4, Pz5 et Pz6 PONTIGNAC 1994 Nappe sup (Heckett) 113/125 mm
- ● Pz9 et Pz11 PONTIGNAC 1994 Nappe superficielle 64/75 mm
- ● Pz 14-15-16-17-18-19 et 20 PONTIGNAC 1998 Nappe superficielle 113/125 mm
- ■ Pz21, Pz22 et Pz23 PONTIGNAC 1998 Piézo d'observation nappe sup 64/75 mm.

- ○ Pz7 et Pz10 PONTIGNAC 1994 Nappe profonde 113/125 mm
- ○ Pz12 et Pz13 PONTIGNAC 1998 Nappe profonde 80/90 mm
- ● PzVal c : Privé Vallourec ? de 1999 Nappe superficielle
- ○ Pz24 PONTIGNAC Juillet 2000 Carottage à la craie (INERIS)
- ○ Pz25 PONTIGNAC 2001 Carottage à la craie (INERIS)



Exemple d'une fiche signalétique de prélèvement

Annexe 5

CNRSSP

Novembre 1998

C N R S S P
Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués

Date : 10/06/98
Opérateur(s) .....
Projet : .....
Site : .....

Nature de l'échantillon

☒ Sol ☐ Eau de surface ☐ Eau souterraine ☐ Gaz

Mode de prélèvement

Sol	Eau	Gaz
☐ Manuel	☐ Manuel	☐ Tubes gaz
☒ Pelle mécanique	☐ Préleveur	☐ Manuel
☐ Forage carotté	☐ Pompe, type :	☐ Pompe
☐ Tarrière	☐ Purge : Durée : ..... Débit :	

N° Echantillon : Sondage A1

Localisation :

Profondeur : 3,50 m
Photo(s) N° :
Commentaires (déroulement du prélèvement, ...)
eau en fond de fosse
forte odeur de goudron

Croquis (fosse, tranchée, piézo, carotte, ...)

- Voûte maçonnerie à 1,70 m - 1,80
- au dessus : remblai noir schistera
- en dessous forte odeur goudron remblai + grossier brai (déblais de maçonnerie briques) etc.
goudron suitant

Photo 17

Ech 1 0-2m
Ech 2 2m50
Ech 3 3m50

Echantillon N° :

Quantité prélevée :

Date/heure :

Conditionnement :

Conservation / transport :

Infos météo (%HR, T°C, Pression, vent, pluie ...) :

Autres mesures réalisées sur site (physico-chimie, ...)

Description échantillon

Quantité prélevée : 3 x 0,5 l.

Observations (couleur, odeur, homogénéité, MES, granulométrie, ...) :

Protocoles opératoires mis en œuvre pour la détermination des concentrations en HAP, COT et azote ammoniacal

Annexe 6

CNRSSP

Juin 1999

ANALYSE DES HAP DANS LES SOLS :

Préparation des échantillons (utilisation de 100 gr d'échantillon):

- ✓ séchage du sol à l'air (72 h) ;
- ✓ broyage des agrégats manuellement au pilon;
- ✓ tamisage à 2 mm (c'est sur cette fraction tamisée que les extractions se font).
- ✓

Extraction à l'ASE (Accelerated Solvant Extraction) :

- ✓ extraction automatique à l'ASE avec un mélange 50/50 en volume de dichlorométhane et d'acétone;
- ✓

Evaporation du solvant en sortie de l'ASE :

- ✓ évaporation presque complète du solvant sous un flux d'air comprimé (sec et déshuilé) ;
- ✓ échange de solvant, pour compatibilité avec HPLC-UV, avec l'acétonitrile .
- ✓ ajout de 5 ml d'acétonitrile puis nouvelle phase d'évaporation ;
- ✓ ajout de 5 ml d'acétonitrile ;
- ✓ les échantillons sont alors pesés puis prêts pour être analysés à l'HPLC-UV.

HPLC-UV (High Pressure Liquid Chromatography UV) de marque Waters :

- ✓ analyse automatique à l'HPLC (détecteur à barrette de diode UV)

ANALYSE DU COT DANS LES SOLS :

Préparation des échantillons :

- ✓ Sécher les échantillons dans des coupelles en aluminium à l'étuve (40°C) ;
- ✓ Broyer l'échantillon jusqu'à l'obtention d'une fine poudre relativement homogène ;
- ✓ Transférer l'échantillon dans un flacon fermé et étiqueté.

Analyse : COTmètre TOC 5000 de Shimadzu avec module solide SSM-5000A :

- ✓ peser une masse d'échantillon à analyser (50 à 100 mg) ;
- ✓ analyse du carbone total puis inorganique, le carbone organique est la différence des deux.

ANALYSE DU NH_4^+ DANS LES SOLS :

Extraction à l'eau :

- ✓ Peser 2 à 5 g de sol humide, les transférer dans un erlenmeyer de 250 ml. Ajouter 50 ml d'eau déminéralisée ;
- ✓ Agiter 1 heure - laisser décanter une nuit ;
- ✓ Filtrer le surnageant dans une fiole de 100 ml ;
- ✓ Ajouter 50 ml d'eau distillée. Agiter 1 heure ;
- ✓ Filtrer en ajoutant au 1er extrait ;
- ✓ Compléter à 100 ml.

Analyse par colorimétrie automatisée

ANALYSE DES HAP DANS LES EAUX :

Extraction liquide-liquide :

Certains HAP étant sensibles à la lumière, éviter de réaliser l'extraction en lumière vive.

1. Verser 500 ml d'échantillon dans une ampoule à décanter.
2. Rincer soigneusement la fiole jaugée (500 ml) avec 25 ml de dichlorométhane et transvaser dans l'ampoule à décanter.
3. Agiter vigoureusement pendant 3 minutes et laisser décanter 5 minutes.
4. Récupérer la phase dichlorométhane dans un tube à concentrer de 250 ml.
5. Répéter l'opération 2 fois en transvasant 25 ml de dichlorométhane mais en laissant décanter seulement 3 minutes.

Remarque : En cas de présence importante de matières en suspension, il est nécessaire de répéter plusieurs fois la phase d'extraction (au moins trois fois).

Concentration

1. Transférer l'extrait dichlorométhane dans un tube pour évaporateur rotatif de 250 ml.
2. Evaporer à l'évaporateur rotatif sous vide à 30°C jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'environ 5 à 6 ml.
3. Verser l'extrait dans une fiole de 10 ml et ramener le volume d'extraction à 10 ml en rinçant 3 fois le tube avec 3x1 ml de dichlorométhane.

Changement de solvant

1. Prélever 2 ml du concentré et transférer dans un tube préalablement taré (masse 1).
2. Evaporer le dichlorométhane sous flux tangentiel d'air jusqu'à l'obtention d'un volume de 0.5 à 1 ml.
3. Ajouter 2 ml d'acétonitrile et continuer l'évaporation sous flux tangentiel jusqu'à environ 2 ml : un tube témoin contenant 2 ml d'acétonitrile sera placé à côté pour juger de l'arrêt de l'évaporation.
4. Peser le tube (masse 2) contenant l'extrait concentré dans l'acétonitrile afin de déterminer précisément le volume :

$$V = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho}$$

où ρ = masse volumique de l'acétonitrile = 0,781 g/cm^3

5. Conserver le tube dans du papier aluminium et à 4°C avant l'analyse.

HPLC-UV (High Pressure Liquid Chromatography UV) de marque Waters :

- ✓ analyse automatique à l'HPLC (détecteur à barrette de diode UV)

ANALYSE DES BTEX DANS LES EAUX :

- ✓ Chauffage de l'échantillon
- ✓ Prélèvement (espace de tête de la phase vapeur)
- ✓ Injection de l'espace de tête de la phase vapeur dans une GC-MS (chromatographie gaz avec spectrométrie de masse)
- ✓ L'identification se fait par rapport aux pics des ions caractéristiques..

Echantillonnage sur l'emprise de la cokerie indices organo-leptiques (juin 1998)

Annexe 7

CNRSSP

15 juin 1999

Echantillonnage de juin 1998. X : sans analyse

N° Echantillon.	N° Forage	Profondeur.	NATURE	Degrés de pollution apparent : + : faible ++ : moyen +++ : fort	N° Analyses
1	A1	0-2	remblai noir schisteux	+	5
2	A1	2,5-3	remblai plus grossier hétérogène brai très odorant goudron suintant	+++	2
3	A1	3,5	remblai plus grossier hétérogène brai très odorant goudron suintant	+++	14
4	B1	0-1	remblai noir schisteux fin	+	x
5	B1	2-3,2	remblai fin beige noir avec passées pâteuses dans le fond	++	11
6	C1	0-1,8	remblai noir schisto-charboneux	+	x
7	C1	1,8-2	goudron pâteux (dans caniveau maçonné) imbibant une matrice marneuse	+++	19
8	C1	2-4,5	alternance de niveaux noirs (schistes) et rouges (briques) fins, odorants	++	16
9	E1	1,5-4	remblai noir fin schisto-charbonneux	+	x
10	E1	4-4,2	limon argileux beige faiblement odorant	++	23
11	F1	1-3,5	remblai très hétérogène	+	18
12	I2	0-2	remblai très hétérogène	+	x
13	I2	2-5	limon argilo beige-roux avec passées noires à verdâtres	++	10
14	H2	2-3	remblai très hétérogène	+	x
15	G2	0-3	remblai très hétérogène	+	x
16	F2	0-1	schistes charbonneux + terre végétale	+	x
17	F2	1-4	limon argileux beige roux ou gris-verdâtre à passées charbonneuses noires	++	8
18	E2	0-1	remblai noir schisto charbonneux	+	x
19	E2	1-2,6	limon argileux beige-roux à passées schisto-charbonneuses	+	26
20	D2	0-1,5	fines noires avec boulettes argileuses beiges	+	x
21	D2	1,5-3	limon argileux beige roux mélangé à des fines charbonneuses	+	31
22	C2	0-1	remblai hétérogène	+	x
23	C2	1-2,8	limon argileux avec passées charbonneuses et traces de goudron, très odorant	+++	6
24	B2	0-1	remblai très hétérogène avec goudron suintant forte odeur	+++	32
25	B2	1-5,2	limon argileux gris verdâtre forte odeur de goudron parfois suintant	+++	24
26	A2	0-5	remblai très hétérogène odorant	++	15
27	A2	5	passées goudronneuses pâteuses à suintante forte odeur	+++	42
28	I3	0-1,5	remblai hétérogène à 1m50 poche goudrons liquide à pâteux	+++	x

N° Echantillon.	N° Forage	Profondeur.	NATURE	Degrés de pollution apparent : + : faible ++ : moyen +++ : fort	N° Analyses
29	I4	0,0-2	remblai hétérogène à fines	+	33
30	I4	2-4,5	limon argileux gris vert traces de goudron, odorant	++	9
31	H4	1-2	remblai hétérogène	+	x
32	H4	2-4,5	limon argileux brun à gris verdâtre	+	25
33	H5	1-2,5	limon argileux roux avec quelques passées plus sombres	++	1
34	H5	2,5-5	limon argileux gris-verdâtre	+	3
35	H3	0-0,2	braie	++	x
36	H3	2,5	goudron	+++	28
37	G5	1,6-2,5	schistes noirs et goudrons	+++	34
38	G4	1,8	remblais imprégnés contre maçonnerie, odorant	++	37
39	G5	1-1,6	sables ocres	+	4
40	A3	0-0,8	remblai (contre mur en BA)	+	x
41	A3	0,8	goudron pur liquide (contre mur en BA, int cuve?)	+++	x
42	A4	1,8-2,1	schistes grossiers imprégnés	++	x
43	A4	0-1,8	remblai schistes sableux fins	+	40
44	B4	0-0,5	remblai sablo-limoneux	+	x
45	B4	1,3-1,6	schistes noirs	+	x
46	C3	2,1	fines légèrement imbibées	++	27
47	C4	1-2	schistes noirs imbibés	++	36
48	D4	1,9-2,5	schistes noirs imbibés forte odeur	+++	17
49	D4	0,5-1,4	remblai de fines + plaque de braie à 1m40	+	x
50	D3	1,5	remblais grossiers + fines imbibées	++	13
51	D3	2,1	fines schistes noirs imbibés + goudron très odorants	+++	22
52	E4	0,3-0,5	remblai sableux à grossier clair	+	x
53	E4	0,5-1,5	remblais schistes noirs imbibés odorants	++	38
54	E5	0,3-1,7	remblai grossier hétérogène	+	x
55	E5	1,7-2	argilo-limoneux avec gravats au sommet faible odeur	++	39
56	E3	0,7-1,9	remblais, schistes noirs imprégnés odorants	++	20
57	E3	1,9-2,5	argilo-limoneux gris vert tacheté de noir	++	29

N° Echantillon.	N° Forage	Profondeur.	NATURE	Degrés de pollution apparent : + : faible ++ : moyen +++ : fort	N° Analyses
58	F3	0,3-0,9	remblai hétérogène sain sableux clair	+	12
59	F3	1,5-1,9	argilo-limoneux gris vert taché	++	7
60	F4	0,2-1,5	fines, schistes noirs imprégnés	++	35
61	F4	1,5	argilo-limoneux gris-vert : en biais	+	21
62	F4	1,5-2,4	fines complètement imbibées très odorantes	+++	45
64	F5	1,2-1,9	niveau argilo-limoneux à silex	+	30
63	F5	1,9-2,5	fines imprégnées goudronneuse très odorantes	+++	43
65	Z2	3,0-4,0	argilo-limoneux beige puis gris imprégnés très odorant	+++	44
66	D1	1,5	remblai grossier	+	x
67	D1	4,5	argilo-limoneux	+	41
X	B3	0,8	goudron pur idem A3 - Pas d'échantillon	+++	x
X	Z1	0-3,5	remblai + schiste sans imprégnation ni odeur - Pas d'échantillon	+	x
X	Z3	1,5	goudron pur liquide idem à 10 m vers Z2 - Pas d'échantillon	+++	x

Résultats bruts des analyses HAP dans le sol en mg/kg de sol sec (août 1998)

Annexe 8

CNRSSP

15 juin 1999

Lieu prélèv.	Profondeur [m]	naphtalène	acénaphtylène	acénaphtène	fluorène	phénanthrène	anthracène	fluoranthène	pyrène	benzo(a)anhtracène	chrysène	benzo(b)fluoranthène	benzo(k)fluoranthène	benzo(a)pyrène	dibenzo(a,h)anthracène	benzo(g,h,i)pérylène	indeno(1,2,3)pyène	Somme 10 HAP	Somme 16 HAP
A1	2,5-3	212.55	9.13	526.65	1775.17	6238.72	4333.40	3613.68	2051.85	881.33	983.04	410.28	197.38	630.51	52.71	241.34	183.16	**17515.14**	**22340.92**
A1	0-2	0.04	0.00	0.18	0.67	3.68	2.39	4.84	2.56	2.19	1.87	1.74	0.78	2.02	0.21	1.12	0.91	**19.84**	**25.20**
A1	3,5	985.35	13.21	721.30	2276.18	6889.73	8179.12	2550.83	1440.20	323.31	440.88	97.81	49.15	128.17	6.42	47.70	30.36	**19624.59**	**24179.71**
A2	0-5	2.31	1.63	30.82	349.58	1406.78	1265.94	912.78	390.29	133.84	206.95	46.40	21.82	54.22	2.28	20.03	13.19	**4037.86**	**4858.86**
A2	5	58.10	1.05	36.22	98.45	176.48	52.10	69.79	25.42	7.65	4.38	2.10	0.97	3.41	0.20	1.26	0.86	**375.00**	**538.45**
A3	0,8	70671.94	7798.09	10827.02	17185.90	44784.92	5408.81	26498.45	10422.54	7459.45	3292.32	4552.80	2201.15	10187.37	903.04	4054.25	3047.74	**177606.40**	**229295.79**
A4	0-1,8	0.00	0.00	0.00	0.04	0.74	0.11	0.72	0.09	0.40	0.13	0.00	0.00	0.08	0.01	0.07	0.02	**2.28**	**2.42**
B1	2-3,2	0.07	0.00	0.24	0.54	2.64	0.92	2.98	1.19	1.08	0.78	0.67	0.25	0.85	0.10	0.48	0.35	**10.39**	**13.14**
B2	1-5,2	15.08	1.55	66.82	113.02	367.50	99.26	311.38	148.73	48.55	29.68	11.75	4.95	12.37	0.93	15.77	2.63	**907.16**	**1249.95**
B2	0-1	< lim d.	< lim d.	< lim d.	8.09	77.94	14.94	83.12	31.66	25.24	16.58	18.96	8.15	28.02	2.42	14.29	11.64	**279.91**	**341.04**
C1	2-4,5	53.46	0.64	17.72	35.90	33.20	9.38	16.72	8.40	2.61	1.09	1.09	0.45	1.51	0.11	0.56	0.41	**119.40**	**183.25**
C1	1,8-2	1325.77	11.31	1777.13	2377.80	6859.64	1285.05	6297.43	3973.93	987.54	516.96	303.16	150.45	418.55	26.35	135.74	93.89	**18071.04**	**26540.71**
C2	1-2,8	2.22	0.07	33.41	59.61	105.32	18.22	44.10	18.84	4.04	1.38	0.63	0.28	0.87	0.04	0.02	0.15	**176.61**	**289.21**
C3	2,1	0.08	0.03	0.07	0.76	1.63	0.46	1.53	0.41	0.62	0.26	0.24	0.11	0.41	0.04	0.17	0.11	**5.38**	**6.93**
C4	1-2	35.21	1.31	0.90	9.17	21.94	19.42	74.08	33.08	34.79	30.48	22.92	11.24	28.86	2.81	17.35	14.38	**287.74**	**357.95**
D1	4,5	0.38	0.04	0.50	1.88	12.57	3.81	18.26	10.49	8.71	6.92	6.02	2.66	9.02	0.87	4.42	3.29	**70.05**	**89.85**
D2	1,5-3	0.81	0.81	0.81	1.29	4.76	6.62	20.18	9.28	11.46	8.31	7.75	3.79	9.52	5.18	5.65	4.28	**75.39**	**100.50**
D3	1,5	61.44	7.05	20.55	40.52	75.24	25.37	46.95	19.23	16.61	12.63	14.29	6.34	17.38	1.91	9.56	7.94	**279.46**	**383.02**
D3	2,1	33.41	2.29	248.08	276.28	217.25	42.18	55.16	19.22	9.98	5.12	4.62	2.12	6.11	0.75	2.99	0.12	**374.45**	**925.68**
D4	1,9-2,5	92.32	2.24	128.93	98.43	30.60	9.90	21.74	8.34	6.39	3.02	3.52	1.64	4.90	0.44	2.08	1.84	**174.42**	**416.32**
E1	4-4,2	0.00	0.00	0.00	0.21	1.39	0.27	1.52	0.92	0.43	0.33	0.25	0.11	0.64	0.04	0.25	0.16	**5.10**	**6.52**
E2	1-2,6	0.03	0.03	0.03	0.14	0.86	0.26	2.11	0.65	2.38	1.83	1.52	0.71	2.08	0.22	1.15	0.72	**12.12**	**14.72**
E3	0,7-1,9	348.19	9.05	1957.86	2117.90	1424.93	357.78	152.08	54.92	22.42	11.70	9.10	4.06	0.16	0.97	0.49	0.16	**2321.97**	**6471.78**
E3	1,9-2,5	59.59	2.23	432.67	376.38	395.84	58.71	59.67	20.11	6.92	3.86	2.73	0.16	0.16	0.97	0.48	0.16	**585.56**	**1420.64**
E4	0,5-1,5	260.99	2.12	185.69	119.19	72.81	15.46	5.32	7.48	1.98	3.99	3.49	0.17	5.82	1.00	0.50	0.17	**367.20**	**686.17**
E5	1,7-2	86.05	2.45	17.60	28.83	29.60	11.84	48.65	20.93	20.42	12.70	16.82	7.21	21.28	2.07	14.16	13.38	**265.28**	**353.97**
F1	1-3,5	3.77	0.84	2.61	59.26	169.67	508.35	174.27	77.06	43.63	58.51	28.25	13.29	30.42	2.25	18.14	13.71	**1033.76**	**1204.02**
F2	0-1	0.11	0.02	0.18	0.26	0.88	0.42	0.81	0.27	0.34	0.19	0.21	0.08	0.25	0.03	0.15	0.11	**3.34**	**4.31**
F3	1,5-1,9	1.77	0.00	9.68	6.98	9.06	0.71	1.69	0.49	0.17	0.07	0.09	0.04	0.08	0.01	0.06	0.04	**13.68**	**30.94**
F3	0,3-0,9	4.29	0.41	1.19	3.42	17.49	6.76	26.08	10.90	13.71	11.61	10.99	4.67	12.31	1.45	7.99	6.13	**111.04**	**139.41**
F4	1,5	0.88	0.07	1.96	1.15	0.72	0.08	0.20	0.00	0.06	0.03	0.06	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	**2.14**	**5.43**
F4	0,2-1,5	41.09	1.68	1.65	3.09	5.34	0.80	3.71	0.69	1.46	0.97	1.46	0.59	1.60	0.21	1.32	0.69	**57.57**	**66.36**
F4	1,5-2,4	234.73	6.80	164.00	189.21	222.62	24.59	19.87	0.45	2.49	0.98	0.18	0.09	0.09	0.53	0.27	0.09	**505.81**	**866.98**
F5	1,2-1,9	0.03	0.00	0.03	< lim d.	0.11	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	**0.21**	**0.28**
F5	1,9-2,5	0.05	0.29	13.17	21.05	5.13	3.79	16.56	9.21	4.27	2.99	2.47	0.96	3.34	0.32	1.62	1.12	**39.83**	**86.34**
G4	1,8	55.95	3.69	7.69	12.83	15.47	4.39	11.60	4.48	4.22	2.90	3.78	1.14	4.57	0.34	0.26	2.37	**102.89**	**135.71**
G5	1-1,6	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	**0.16**	**0.21**
G5	1,6-2,5	3.34	3.05	33.21	42.73	34.06	9.36	9.05	2.38	2.47	0.94	0.94	0.03	1.47	0.19	1.06	0.31	**62.10**	**144.59**
H3	2,5	50.51	34.11	9.97	120.68	303.20	62.84	201.47	50.87	55.85	35.91	26.93	15.96	1.00	5.98	2.99	1.00	**730.72**	**979.27**
H4	1-2,5	0.00	0.00	0.02	0.11	0.27	0.05	0.28	0.09	0.11	0.05	0.11	0.05	0.13	0.01	0.08	0.07	**1.09**	**1.43**
H5	1-2,5	0.00	0.00	0.04	0.10	0.15	0.02	0.12	0.03	0.05	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.03	0.02	**0.46**	**0.66**
H5	2,5-5	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	**0.21**	**0.25**
I2	2-5	0.32	0.04	0.36	0.81	2.92	1.47	7.20	4.07	2.90	1.34	1.53	0.44	1.87	0.19	1.27	0.77	**20.50**	**27.51**
I4	2-4,5	1.33	0.51	3.02	36.26	29.83	8.48	34.23	14.47	10.33	5.42	6.10	3.01	7.96	0.89	3.73	3.41	**107.73**	**168.98**
I4	0-2	47.43	2.04	2.04	12.33	33.33	13.28	102.59	50.08	50.17	33.16	41.75	19.88	48.78	4.60	34.37	24.48	**407.46**	**520.30**
Z2	3-4	41.23	0.76	133.99	288.83	1484.31	259.95	1465.06	592.06	296.26	101.71	101.03	32.82	141.04	10.97	40.70	29.94	**3893.01**	**5020.65**

Somme de 10 HAP (naphtalène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, indéno(1,2,3-cd) pyrène)

Echantillonnage sur l'emprise de la cokerie de l'azote ammoniacal en mg/kg de sol brut (août 1998)

Annexe 9

CNRSSP

15 juin 1999

Echantillon	Lieu Prélèv.	Profondeur m	$[NH_4^+]$ mg/kg brut mg/kg de sol
1	A1	0-2	
2	A1	2.50	<5
3	A1	3.50	
5	B1	2-3,2	<5
7	C1	1,8-2	<5
8	C1	2-4,5	5
10	E1	4-4,2	5
11	F1	1-3,5	7
13	I2	2,0-5,0	88
17	F2	1,0-4	12
19	E2	1-2,6	6
21	D2	1,5-3	13
23	C2	1-2,8	<5
24	B2	0,0-1	
25	B2	1-5,2	<5
26	A2	0,0-5	<5
27	A2	5.00	
29	I4	0,0-2	<5
30	I4	2-4,5	310
32	H4	2-4,5	10
33	H5	1-2,5	5
34	H5	2,5-5	<5
36	H3	2.50	650
37	G5	1-1,6	<5
38	G4	1.80	<5
39	G5	1,6-2,5	9
41	A3	0.80	
43	A4	0-1,8	<5
46	C3	2.10	<5
47	C4	1,0-2	<5
48	D4	1,9-2,5	
50	D3	1.50	40
51	D3	2.10	230
53	E4	0,3-1,7	6
55	E5	1,7-2	<5
56	E3	0,7-1,9	45
57	E3	1,9-2,5	87
58	F3	0,3-0,9	<5
59	F3	1,5-1,9	17
60	F4	0,2-1,5	<5
61	F4	1.50	120
62	F4	1,5-2,4	30
63	F5	1,9-2,5	11
64	F5	1,2-1,9	<5
65	Z2	3,0-4,0	5
67	D1	4.50	<5

Etude antérieure : paramètres hydrogéologiques

Annexe 10

INERIS : Projet TRANSPOL

Juillet 1999

3.2 HYDROGEOLOGIE A L'ECHELLE LOCALE

3.2.1 Piézométrie de la nappe des graves

Le tableau ci-dessous présente les résultats des mesures de la piézométrie de la nappe des graves et des silts :

Piézomètre	X (en m)	Y (en m)	Cote du sol (m NGF)	Profondeur de la nappe/sol (m)	Niveau de la nappe (m NGF)
PZ4	1507	1614	18,01	3,23	**14,78**
PZ5	1401	1573	18,89	3,92	**14,97**
PZ6	1465	1708	18,64	3,67	**14,97**
PZ 8	1413	1313	20,68	4,65	**16,03**
PZ 9	1604	1642	17,91	2,68	**15,23**
PZ 11	1848	1541	18,30	3,20	**15,10**
PZ 14	1156	1021	19,18	4,07	**15,11**
PZ 15	2001	1687	16,33	1,56	**14,77**
PZ 16	1753	1798	17,36	2,30	**15,06**
PZ 17	1928	1213	16,84	1,95	**14,89**
PZ 18	1464	1242	21,91	6,59	**15,32**
PZ19	1579	1471	19,17	3,86	**15,31**
PZ20	1436	1535	18,30	3,43	**14,87**

La représentation des isopièzes de la nappe des graves obtenues par interpolation des relevés figure à l'**Annexe C**.

La nappe superficielle s'écoule selon une direction générale nord-est sud-ouest perpendiculairement au ruisseau qui l'alimente. L'augmentation de l'équidistance des isopièzes au fur et à mesure que l'on s'éloigne du ruisseau se traduira par des vitesses d'écoulement plus faibles. En effet, le gradient hydraulique de la nappe en bordure du ruisseau est 5 fois plus élevé qu'à l'est du site ($5\ 10^{-3}$ contre 10^{-3}). Les vitesses de transport calculées pour ces gradients sont respectivement de 15 et 3 m/an.

3.2.2 Piézométrie de la nappe de la craie

Une campagne de mesure du niveau piézométrique de la nappe de la craie a été conduite pour l'ensemble des 4 piézomètres captant cette nappe.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Piézomètre	X (en m)	Y (en m)	Cote du sol (m NGF)	Profondeur de la nappe/sol (m)	Niveau de la nappe (m NGF)
PZ 7	1757	1803	18,75	2,34	**16,41**
PZ10	1159	1020	17,21	3,61	**13,60**
PZ12	1583	1475	19,37	4,32	**15,05**
PZ13	1847	1538	18,31	3,50	**14,81**

Le niveau piézométrique de la nappe de la craie est compris entre 2,3 et 4,3 m. De ce fait, la nappe est en charge de l'ordre de 10 mètres. Cette mise en charge est due à la présence de la couche de la formation de Louvil peu perméable, d'une puissance comprise entre 2 et 5 mètres.

La cartographie des isopièzes réalisée à partir de l'interpolation de ces relevés figure à l'**Annexe C**.

La nappe de la craie au droit du site s'écoule selon une direction nord-est sud-ouest. Le gradient moyen *i* mesuré au droit du site est de l'ordre de $2,8\ 10^{-3}$.

La vitesse moyenne de transport au droit du site établie à l'aide de la relation de Darcy est :

$$V = K \times i/\theta = 5,0\ 10^{-4} \times 2,8\ 10^{-3}/0,2 = 1,4\ 10^{-6}\ m/s = 44\ m/an.$$

3.3 ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

3.3.1 Analyses de sols

Le résultat des 70 analyses en HAP dans les sols figure en **Annexe D**. Pour l'ensemble des échantillons ont été indiquées la nature de la matrice ainsi que la profondeur du prélèvement.

Les résultats de ces analyses conduisent aux observations et conclusions suivantes :

- la pollution du sol est essentiellement concentrée au droit des anciennes zones des extracteurs et réservoirs à goudrons, distillation du goudron et phénols, fours à coke et extracteurs. Les analyses ont en effet montré une importante pollution du sol au droit de ces zones avec des concentrations en HAP totaux variant de 100 à 80 000 mg/kg.
- le point de prélèvement P13 a montré des goudrons purs (plus de 80 g/kg en HAP totaux à 0,80 m de profondeur dans les remblais). Il s'agit probablement d'une ancienne cuve en maçonnerie non vidangée.

4.2.2 Paramètres hydrodynamiques et de transport

Nous proposons, à titre indicatif, les valeurs et les domaines de variation des paramètres hydrodynamiques et de transport comme indiqué dans les tableaux ci-dessous :

Couche 1 (Graves)

Paramètre	Valeur initiale	Domaine de variation
Perméabilité (m/s)	$2,5\ 10^{-5}$	10^{-5}-$5.\ 10^{-5}$
Dispersivité longitudinale (α_L) (en m)	40	20-60
Dispersivité transversale (α_T) (en m)	10	0-20
Porosité totale [-]	0,30	0,2-0,4
Porosité cinématique [-]	0,2	0,15-0,25
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,7	1,6-1,8

Couche 2 (Argile de Louvil)

Paramètre	Valeur initiale	Domaine de variation
Perméabilité	$5\ 10^{-9}$	10^{-8}-10^{-9}
Porosité totale [-]	0,20	0,3-0,5
Porosité cinématique [-]	0,01	0,01-0,02
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,4	1,3-1,5

Couche 3 (Craie)

Paramètre	Valeur initiale	Domaine de variation
Transmissivité [m²/s]	$5\ 10^{-3}$	10^{-3}-10^{-2}
Dispersivité longitudinale (α_L) (en m)	70	40-100
Dispersivité transversale (α_T) (en m)	20	5-40
Porosité totale [-]	0,20	0,15-0,25
Porosité cinématique [-]	0,03	0,01-0,05
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,8	1,7-1,9

4.2.3 Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée dans l'environnement du site est de l'ordre de 680 mm comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

4 CAHIER DES CHARGES DE LA MODELISATION

4.1 CALAGE DES MODELES

4.1.1 Calage du modèle d'écoulement

Un calage du modèle d'écoulement sera réalisé en supposant les profils piézométriques décrits en Annexe C. Les calculs de l'écoulement seront réalisés en régime permanent. Le modélisateur établira à sa convenance les conditions aux limites du modèle hydrodynamique soit à partir des profils piézomètriques présentés à l'Annexe C soit à partir des gradients hydrodynamiques.

Il sera supposé par la suite que l'horizon de la craie a une épaisseur efficace de 20 mètres.

4.1.2 Calage du modèle de transport

Un calage du modèle de transport sera réalisé en considérant les sources de pollutions de sol actuelles et en supposant :

- l'absence de pollution des 2 nappes,
- un démarrage de la pollution il y a 40 ans.

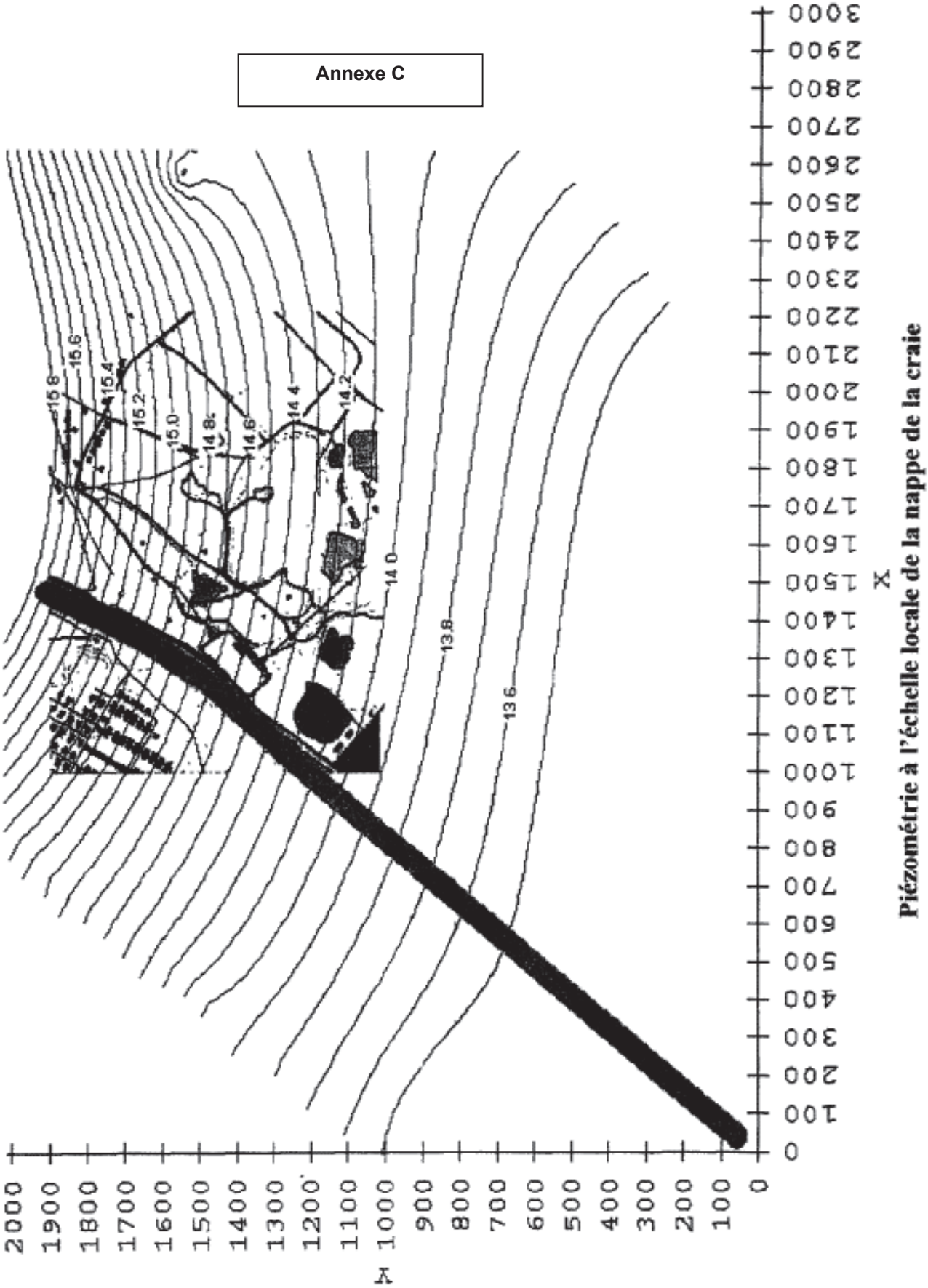
4.2 PARAMETRES DE MODELISATION

4.2.1 Paramètres physico-chimiques

Afin de disposer d'une base de travail commune, nous proposons de fixer certains paramètres physico-chimiques des HAP comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

HAP considéré	Solubilité (mg/l)	Coefficient de partage eau/carbone organique K_{oc} (cm^3/g)
Naphtalène	3,50E+01	1,30E+03
Acénaphtylène	3,93E+00	5,01E+03
Acénaphtène	3.42E+00	4,60E+03
Fluorène	1,69E+00	7,30E+03
Phénantrène	1,00E+00	1,40E+04
Anthracène	4,50E-02	1,40E+04
Fluoranthène	2,06E-01	3,80E+04
Pyrène	1,32E-01	3,80E+04
B(a)A	5,70E-03	2,00E+05
Chrysene	1,80E-03	2,00E+05
B(b)F	1,40E-02	5,50E+05
B(k)F	4,30E-03	5,50E+05
B(a)P	1.20E-03	5,50E+06
D(a,h)A	5,00E-04	3,30E+06
B(g,h,i)P	7,00E-04	1,60E+06
I(c,d)P	5,30E-04	1,60E+06

Annexe C



Piézométrie à l'échelle locale de la nappe de la craie

La foration

Annexe 11

Clément forage

2001

Lorsque l'on décide de réaliser un forage, pour la mise en place d'un piézomètre, ce que l'on cherche à réaliser est la meilleure interface possible entre la nappe d'eau et la pompe, dans des terrains variés : alluvions, argiles, sable, calcaire ou granit. Pour ce faire, il faudra donc traverser des couches hétérogènes qui demanderont chacune une technique de forage appropriée.

Terrains hétérogènes *Alluvions principalement*

Quatre techniques principales :

- battage
- rotary
- foration Odex
- foration dite à l'avancement

Battage : utilisé pour les puits en gros diamètre, les sédiments sont enlevés à l'aide d'une benne preneuse, le tubage est battu pour pénétrer dans le sol.

Rotary avec ou sans circulation inversée, utilisé pour les forages très profonds ou de diamètre moyen, nécessite un matériel lourd. Le fluide ici est de la boue bentonitique (ou un de ses dérivés) animée à l'aide d'une pompe à boue. La sédimentation se fait dans des bacs de décantation

Odex Cette foration consiste en l'entraînement d'un tubage résistant (acier), par la frappe d'un marteau pneumatique fond de trou prenant appui sur un sabot.

Ce type de foration est à réserver pour des cas bien précis de soutènement des zones dures et tendres, par exemple blocs et sables. Il est déconseillé pour un captage définitif pour les raisons suivantes :

- crépines mal adaptées à la formation sableuse. En, effet, il est techniquement impossible de réaliser des crépines performantes et de longueur suffisante. Dans le meilleur des cas les crépines trop larges (> à 2mm), le plus souvent ce sont des tubes perforés à l'aide d'un chalumeau ou d'un disque à tronçonner dont l'épaisseur sera dans tous les cas trop importante et mal adaptée à formation captée.
- l'impossibilité de mettre suffisamment de longueur de crépines car celle-ci provoquent la dilution de l'air de refoulement des sédiments dans la formation, et donc l'impossibilité de remonter ces sédiments jusqu'à la surface.
- la nature même du matériau restant en contact avec l'eau (acier) entraînant sa détérioration dans le temps : oxydation importante réduisant la vie du forage à une vingtaine années.

En conclusion la foration Odex doit être d'un diamètre suffisant pour les formations hétérogènes et permettre la mise en place de crépines dignes de ce nom et surtout ce tubage doit être retiré pour permettre de libérer tout l'aquifère.

Figure 103 : *Foration Odex à l'air comprimé*

Foration à l'avancement C'est la foration idéale pour traverser les formations hétérogènes. Un tubage acier plein provisoire est propulsé par rotation, éventuellement par un système type Odex ou les deux combinés. Le diamètre est supérieur au diamètre de foration finale. Ce système a l'avantage de traverser les formations et de rendre étanche une nappe aquifère que l'on veut isoler ou au contraire recouper sur toute sa hauteur. Lorsque le terrain le permet le tubage reste en place alors que la foration continue pour permettre d'atteindre une seconde nappe par exemple, en effet le diamètre est suffisant pour permettre la mise en place avec le **maximum de précisions,** de **crépines performantes**, de longueur parfaitement adaptée au captage

Celles-ci en cas de nécessité peuvent être choisies à posteriori, puisque le trou sera libre avant la mise en place du tubage définitif. Lorsque le tubage est posé, ce tubage avancement est intégralement retiré, permettant éventuellement la mise en place du massif de gravier. Le tubage définitif fournira toutes les garanties nécessaires en matière de capacité de filtration, de surface captante suffisante, et par-là même une vitesse d'écoulement d'eau dans le forage le plus faible possible, limitant ainsi l'ensablement.

Terrains homogènes

Destructif (Marteau fond de trou), marteau pneumatique animé par de l'air comprimé à très haute pression. Les sédiments sont ramenés à la surface par l'air d'évacuation du marteau. C'est en théorie la technique le plus rapide. Elle permet de vérifier les arrivées d'eau dans le forage au fur à mesure de l'avancement.

Figure 104 : *Matériel de perforation*

Résultat brut des analyses HAP dans les eaux des piézomètres de la nappe superficielle Somme des 6 et des 16 HAP (concentrations en µg/L) (octobre 1998)

Annexe 12

CNRSSP

Novembre 1998

Lieu prélèv.	naphtalène	acénaphtylène	acénaphtène	fluorène	phénanthrène	anthracène	fluoranthène	pyrène	benzo(a)anhtracène	chrysène	benzo(b)fluoranthène	benzo(k)fluoranthène	benzo(a)pyrène	dibenzo(a,h)anthracène	benzo(g,h,i)pérylène	indeno(1,2,3-cd)pyène	Somme 6 HAP	Somme 16 HAP
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	**µg/l**	**µg/l**
Pz4(1)	1.823	0.379	120.620	122.262	130.144	18.389	94.334	43.587	18.767	6.731	5.953	3.716	7.666	1.345	4.052	3.405	**119.125**	**583.171**
Pz4(2)	0.473	0.528	97.540	106.433	119.643	17.404	88.552	42.802	16.951	7.413	5.849	3.813	15.664	1.570	4.258	3.147	**121.283**	**532.041**
Pz5	129.741	7.567	392.376	687.643	1201.878	188.069	1015.701	486.017	253.492	76.773	85.916	52.180	108.932	14.188	54.230	45.874	**1362.833**	**4800.576**
Pz8	749.500	1.866	130.630	65.941	45.411	2.923	5.159	1.579	0.743	0.717	1.081	1.328	1.772	1.356	1.553	1.055	**11.946**	**1012.614**
Pz9	0.050	0.015	8.885	1.031	0.435	0.114	0.476	0.301	0.535	0.888	1.294	1.388	0.625	1.321	1.286	1.169	**6.238**	**19.813**
Pz11	<0,03	<0,03	0.290	0.024	0.083	0.017	0.110	0.021	0.035	0.017	<0,007	<0,003	<0,003	<0,02	<0,01	<0,003	**<0.136**	**<0.71**
Pz14	<0,04	0.074	27.302	0.346	<0,002	0.026	0.088	0.022	0.044	0.037	<0,007	0.022	<0,004	0.044	<0,01	<0,004	**<0.135**	**<28.07**
Pz15	<0,04	<0,04	0.376	0.015	0.027	<0,002	0.049	<0,02	0.034	0.015	<0,008	0.011	<0,004	<0,02	<0,01	<0,004	**<0.086**	**<0.67**
Pz16	0.101	<0,04	0.334	0.036	0.081	0.016	0.056	<0,02	<0,003	<0,004	<0,008	<0,004	<0,004	<0,02	<0,01	<0,004	**<0.09**	**<0.75**
Pz17	<0,04	<0,04	0.311	<0,004	0.015	0.008	0.045	<0,02	0.095	0.178	0.178	0.231	0.258	0.250	0.235	0.197	**1.145**	**<2.1**
Pz18	1.644	<0,04	1.857	1.279	2.218	0.184	0.417	0.188	<0,003	<0,004	<0,008	<0,004	<0,004	<0,02	<0,01	<0,004	**<0.45**	**<7.89**
Pz19	0.425	<0,04	0.437	0.042	0.029	0.012	<0,02	<0,02	0.017	0.821	<0,008	<0,004	<0,004	<0,02	<0,01	<0,004	**<0.054**	**<1.92**
Pz20	1626671.899	79319.722	247357.239	139037.753	70351.277	12996.190	12190.641	4564.778	2148.131	1396.285	859.252	214.813	114441.658	150.906	569.792	268.516	**128544.672**	**2312538.852**

Analyseur : HPLC à détecteur UV :

Seuil de détection : 0,004 à 0,04 µg/L suivant HAP

Concentrations en HAP [µg/L] mesurées dans les eaux des piézomètres Pz9 - Pz18 - Pz19 au mois de novembre 1999

Annexe 13

CNRSSP

Septembre 2000

Pz19 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène	0,018	0,048	0,028	0,032	0,015	49
Acénaphtylène						
Acénaphtène						
Fluorène	0,094	0,171		0,133	0,055	42
Phénanthrène	0,091	0,272	0,229	0,197	0,094	48
Anthracène	0,271	0,362	0,093	0,242	0,137	57
Fluoranthène	0,078	0,306	0,291	0,225	0,128	57
Pyrène	0,055	0,198	0,164	0,139	0,075	54
Benzo(a)anhtracène	0,059	0,112	0,102	0,091	0,028	31
Chrysène	0,059	0,093	0,096	0,083	0,020	25
Benzo(b)fluoranthène	0,039	0,011	0,012	0,021	0,016	75
Benzo(k)fluoranthène	0,052	0,015	0,062	0,043	0,025	58
Benzo(a)pyrène	0,094	0,130	0,124	0,116	0,020	17
Dibenzo(a,h)anthracène	0,014		0,012	0,013		
Benzo(g,h,i)pérylène	0,064		0,093	0,078	0,020	26
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,055		0,056	0,055		
Somme	**1,043**	**1,719**	**1,360**	**1,374**	**0,338**	**25**

Pz18 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène	0,039	0,073	0,082	0,065	0,022	35
Acénaphtylène						
Acénaphtène						
Fluorène	0,075	0,213	0,332	0,207	0,129	62
Phénanthrène	0,297	0,230	0,824	0,450	0,325	72
Anthracène	0,129	0,322	0,601	0,351	0,237	68
Fluoranthène	0,878	0,403	0,958	0,746	0,300	40
Pyrène	0,691	0,533	1,000	0,742	0,238	32
Benzo(a)anhtracène	0,179	0,101	0,328	0,202	0,115	57
Chrysène	0,161	0,078	0,296	0,178	0,110	62
Benzo(b)fluoranthène	0,050	0,011	0,141	0,067	0,067	99
Benzo(k)fluoranthène	0,079	0,073	0,296	0,149	0,127	85
Benzo(a)pyrène	0,190	0,101	0,032	0,107	0,079	74
Dibenzo(a,h)anthracène	0,021	0,011	0,187	0,073		
Benzo(g,h,i)pérylène	0,129	0,081	0,146	0,118	0,034	28
Indeno(1,2,3-cd)pyène		0,048		0,048		
Somme	**2,918**	**2,279**	**5,222**	**3,473**	**1,548**	**45**

Pz9 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène	0,098	0,104	0,082	0,1	0,0	12
Acénaphtylène						
Acénaphtène	4,693	8,135	13,700	8,8	4,5	51
Fluorène	0,708	1,198	1,974	1,3	0,6	49
Phénanthrène	0,586	0,505	0,647	0,6	0,1	12
Anthracène	0,399	0,345	0,487	0,4	0,1	18
Fluoranthène	1,144	0,908	1,348	1,1	0,2	19
Pyrène	0,897	0,740	0,975	0,9	0,1	14
Benzo(a)anhtracène	0,405	0,261	0,353	0,3	0,1	22
Chrysène	0,363	0,224	0,297	0,3	0,1	24
Benzo(b)fluoranthène	0,226	0,597	0,138	0,3	0,2	76
Benzo(k)fluoranthène	0,179		0,155	0,2	0,0	10
Benzo(a)pyrène	0,457		0,340	0,4	0,1	21
Dibenzo(a,h)anthracène	0,051			0,1		
Benzo(g,h,i)pérylène	0,307	0,198	0,065	0,2	0,1	64
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,196	0,145	0,176	0,2	0,0	15
Somme	**10,711**	**13,361**	**20,737**	**14,9**	**5,2**	**35**

Concentrations en HAP [µg/L] mesurées dans les eaux des piézomètres Pz9 - Pz18 - Pz19 au mois de mars 2000

Annexe 14

CNRSSP

Septembre 2000

Pz19 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène	0,055	0,034	0,009	0,033	0,023	70
Acénaphtylène						
Acénaphtène						
Fluorène		0,036	0,038	0,037	0,002	5
Phénanthrène	0,164	0,211	0,142	0,172	0,035	20
Anthracène	0,042	0,171	0,038	0,084	0,076	90
Fluoranthène	0,107	0,479	0,246	0,277	0,188	68
Pyrène	0,205	0,360	0,123	0,229	0,120	52
Benzo(a)anhtracène	0,058	0,171	0,085	0,105	0,059	57
Chrysène	0,042	0,121	0,058	0,074	0,042	57
Benzo(b)fluoranthène						
Benzo(k)fluoranthène		0,114		0,114		
Benzo(a)pyrène	0,077	0,114		0,096	0,027	28
Dibenzo(a,h)anthracène	0,004	0,014	0,004	0,007	0,006	82
Benzo(g,h,i)pérylène	0,115	0,150		0,133	0,025	19
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,054	0,107	0,042	0,068	0,035	51
Somme	**0,923**	**2,083**	**0,786**	**1,264**	**0,713**	**56**

Pz18 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène	0,177	0,149	0,178	0,168	0,017	10
Acénaphtylène						
Acénaphtène	0,011	0,003	0,022	0,012	0,010	79
Fluorène	0,164	0,082	0,104	0,117	0,042	36
Phénanthrène	0,480	0,126	0,292	0,300	0,177	59
Anthracène	0,155	0,060	0,097	0,104	0,048	46
Fluoranthène	0,806	0,237	0,484	0,509	0,285	56
Pyrène	0,702	0,316	0,468	0,496	0,195	39
Benzo(a)anhtracène	0,298	0,082	0,219	0,200	0,109	55
Chrysène	0,134			0,134		
Benzo(b)fluoranthène						
Benzo(k)fluoranthène			0,146	0,146		
Benzo(a)pyrène	0,323	0,066	0,247	0,212	0,132	62
Dibenzo(a,h)anthracène	0,025	0,003	0,024	0,018	0,012	71
Benzo(g,h,i)pérylène	0,235	0,092	0,223	0,183	0,079	43
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,176	0,032	0,160	0,123	0,079	65
Somme	**3,687**	**1,249**	**2,667**	**2,534**	**1,225**	**48**

Pz9 Composés [µg/L]	1ère mesure	2ème mesure	3ème mesure	moyenne	écart-type	cv
Naphtalène			0,016	0,016		
Acénaphtylène						
Acénaphtène	4,236	5,005	6,674	5,305	1,246	23
Fluorène	0,048	0,057	0,051	0,052	0,005	9
Phénanthrène	0,189	0,084	0,120	0,131	0,054	41
Anthracène	0,052	0,136	0,041	0,076	0,052	68
Fluoranthène	0,542	0,586	0,580	0,569	0,024	4
Pyrène	0,423	0,450	0,445	0,439	0,014	3
Benzo(a)anhtracène	0,072	0,073	0,096	0,080	0,014	17
Chrysène	0,056	0,047	0,062	0,055	0,007	14
Benzo(b)fluoranthène						
Benzo(k)fluoranthène						
Benzo(a)pyrène	0,088	0,084	0,120	0,097	0,020	21
Dibenzo(a,h)anthracène	0,004	0,005	0,010	0,007	0,003	51
Benzo(g,h,i)pérylène	0,135	0,125	0,134	0,132	0,005	4
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,072	0,073	0,100	0,081	0,016	19
Somme	**5,916**	**6,726**	**8,449**	**7,030**	**1,294**	**18**

Références des fabricants et distributeurs des instruments

Annexe 15

CNRSSP Rapport 16/97

1997

Société conceptrice	Société distributrice
ADCPindar Road Hoddesdon, Herts, EN11 0AQ, England - Tél : (44) 0992 469638 - Fax : (44) 0992 444567	Autochim 55 rue de l'aubépine, 92 160 Antony. Tél : 01 40 96 11 22. Fax : 01 40 96 11 30
ALLDOS 7 rue Gütenberg - 67610 La Wantzenau - Tél. : 03 88 59 26 26 - Fax : 03 88 59 26 00	
Allience Instruments ZA Les Bosquets 4 - B.P. 31, 95540 Mery sur Oise - Tél. : 01 30 36 24 24 - Fax : 01 30 36 24 20 - email : Instruments.Alliance@Inforoute.cgs.fr - http://www.inforoute.cgs.fr/alliance	
AMEL s.r.l. Via S. Giovanni Battista de la Salle,4 - 20132 Milano - Italie	Bioblock Scientific région Nord 1 rue Jacques Prévert - 59650 Villeneuve d'Ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16
Analyticon Instruments Corporation P.O. Box 92, 2 Edison Place, Springfield, NJ 07081 USA - Tél : (1) 201 379-6771 - Fax : (1) 20 1379-6795 - http://www.analyticon.com	Alliance Instruments B.P. 215, 95 561 Cergy-Pontoise-Cedex,Tél : 01 34 48 98 98 - Fax : 01 34 48 97 11
Applied Microsystems Ltd. 2035 Mills Road, Sidney, Brittish Columbia, Canada V8L 5X2 - Tél : (1) 604 656 0771 - Fax : (1) 604 655 3655 - email : applied@islandnet.com - http://www.islandnet.com	Ocean Scientific International South down house station road, Petersfield, Hampshire, Angletterre GU32 3ET - Tél.: (44) 01730 265015 - Fax: (44) 01730 265011 - email : osil@soc.soton.ac.uk
AquaLVTIC	Bioblock Scientific Région Nord 1 rue Jacques Prévert 59650 Villeneuve D'ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16- http://www.bioblock.fr
Aqualyse BP N° 8356 - 95804 Cergy Pontoise Cedex - Tél : 01 34 25 05 95 - Fax : 01 34 25 01 55	
Bacharach http://www.bacharach.com	Bioblock Scientific région Nord 1 rue Jacques Prévert 59650 Villeneuve D'ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16- http://www.bioblock.fr
Bio-Orbit Oy P.O. Box 36, FIN-20521 Turku, Finlande - Fax : (358) 2 410 123	Apollo SARL 5 avenue de Touteville - 95 270 Asnière sur Oise - Tél. : 01 30 35 44 36 - Fax : 01 30 35 46 11
Chelsea Instrument Ltd 2/3 Central Avenue, West Molesey, Surrey, KT8 2QZ, Angleterre - Tél : (44) 181 941 0044 - Fax : (44) 181 941 9319) - email : chelsea@compuserve.com - http://www.chelsea.co.uk	Nereides 4 Avenue des Indes, ZA de Courtaboeuf - 91969 Les Ulis, Cedex B - Tél. : 01 69 07 20 48 - Fax : 01 69 07 19 14 - email: 100700.3566@compuserve.com
Chemetrics Inc. Route 28, Calverton, VA 22016, USA - Tél. : (1) 800-356-3072 - email : prodinfo@chemetrics.com - http://www.chemetrics.com	Bioblock scientific
Chromato Sud 19 rue Nauville, 33000 BORDEAUX . Tél : 05 56 24 46 49. Fax : 05 56 99 01 47 - http://www.chromatosud.com	
Chrompack Inc. 1130 Route 202, Raritan, NJ 08869 - USA - Tél. : (1) 908 722-8930 - Fax : (1) 908 722-8365 - email : cpinfous@mars.superlink.net - http://www.chrompack.com	Chrompack France s.a.r.l. B.P. 20, 91941 Les Ulis Cédex - Tél. : 01 69 18 77 50 - Fax : 01 69 07 75 40 - email : cpinfo@worldnet.net

Société conceptrice	Société distributrice
CITA 2 rue du docteur Pressac - ZAC du Grand Noble - 31 700 Blagnac - Tél. : 05 61 30 04 37 - Fax : 05 61 71 67 06	
Columbus Instruments 950 N. Hague Avenue - Columbus, Ohio, 43204-2121 USA - Tél : (1) 614 276 0861 - Fax : (1) 614 276 0529 - email : 75144.2413@compuserve.com - http://www.colinst.com	
Data Link Instruments 53, chemin du Vieux Chêne - 38240 Meylan ZirstTél. : 04 76 90 52 00 - Fax : 04 76 90 52 02e-mail: datalink@mail.eunet.fr - http://www.datalink-instruments.com	
Dexsil Corporation One Hamden Park Drive, Hamden, Connecticut, 06517, USA - Tél. : (1) 800-433-9745 - Fax (1) 800 203-248-6523- email : Dexsil@aol.com - http://www.dewsil.com	
Dr. Bruno Lange GmbH Berlin, Industriemeßtechnik, Willstätterstraße 11, D-40549 Düsseldorf - Allemagne -Tél. : (49) 02 11/52 88 0 - Fax : (49) 02 11/52 88 331 - email : infopg3@drlange.de - http://www.drlange.de	
Drägerwerk http://www.draeger.com	Dräger Industrie Secteur nord-est, 3c rte de la Fédération BP 141, 67 025 Strasbourg cedex 1. Tél : 03 88 40 76 76. Fax : 03 88 40 76 67
ELE International Ltd Eastman Way - Hemel Hempstead - Herfordshire - HP2 7HB - England - Tél : (44) 01 442 218355 - Fax : (44) 01442 252474 - email : ele@eleint.co.ukhttp://www.eleint.co.uk	
Elit (BPS International Plc.) Units 8 & 9, Ironbridge Close off Great Central Way, London, NW10 OUF, Angleterre - Tél : (44) 081 451 6556 - Fax : (44) 081 451 2053	Bioblock Scientific région nord 1 rue Jacques Prévert - 59650 Villeneuve d'Ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16
Elsag Bailey http://www.bailey.com - http://www.hub.de	Elsag Bailey, Hartman & Braun 10 rue Joseph Cugnot - BP 5080 - 57072 Metz Cedex 3 - Tél : 03 87 74 06 11 - Fax : 03 87 74 79 39
Endress + Hauser 3 rue du Rhin - BP 150 - 68331 Hunningue Cedex - Tél. : 03 89 69 67 68 - Fax : 03 89 69 48 02	
EnSys Inc. Tél. : (1) 919-941-5509 - Fax : (1) 919-941-5519	Rhône Diagnostics Technologies Parc d'affaires de Crécy - Bât. 17 - 69370 Saint Didier au Mont D'or - Tél. : 04 78 64 32 00 - Fax : 04 78 47 84 04
Envirol Inc. 1770 Research Park Way #160, North Logan, UT 84341, USA - Tél : (1) 800 748-3548	Equipements Scientifiques S.a. Département BIO-TESTS, 127 rue de Buzenval, BP 26 - 92 380 Garches - Tél. : 01 47 95 99 00 - Fax : 01 47 41 08 33
Enviro Technology Services Plc. Environmental House, Dudbridge Road - Stroud GL5 3EE - England - Tél : (44) 1453 751641 - Fax : (44) 1453 757596 - http://www.et.co.uk	
FCI Environmental Inc 1181 Grier Drive, Building B, Las Vegas, Nevada 89119 - Fax: (1) 702 361-9652	Autochim 55 rue de l'aubépine, 92 160 Antony. Tél : 01 40 96 11 22. Fax : 01 40 96 11 30

Société conceptrice	Société distributrice
Fluka Chimie L'Isle d'Abeau Chesnes - BP 701 - 38297 St Quentin Fallavier - Cédex - Tél : 04 74 82 28 00 - Fax : 04 74 95 68 08.	
Foxboro 600 North Bedford Street, P.O. Box 500, East Bridgewater, MA 02333 USA - http://www.foxboro.com	Meyvis Instruments 18 route de Milly, 91 830 Le- Coudray-Montceaux. Tél : 08 00 90 57 06. Fax : 08 00 90 58 65 - email : helpdesk@meyvis.nl
Gas Tech, Inc. 8407 Central Avenue - Newark, CA 94560-3431, USA - Tél (1) 510 745-8700 - Fax (1) 510 794-6201 - email: @gastech-inc.com - http://www.gastech-inc.com	
Gastec Corporation	PROLABO 54 rue Roger Salengro - 94126 Fontenay-sous-Bois - Tél 01 45 14 87 41 - Fax : 01 45 14 86 42
Gebrüder Heyl Techniparc, 3 rue Boole - Tél. : 01 69 46 17 17 - Fax : 01 69 46 17 40	
GfG AG Im Gassacher 6, CH-8122 Binz - tél. : (41) 1 980 42 52 - Fax : (41) 1 980 42 61	
Grimm Dorfstrasse 9, D-83404 Ainring - Allemagne - Tél : (42) 086545780 - Fax : (42) 0865457810	Intertek Testing Services 91, rue du Général de Gaulle - 27 109 Le Vaudreuil Cedex - Tél. : 02 32 09 36 26 - Fax : 02 32 09 36 28
Groupe Environnement SA 111 Bd Robespierre, 78 300 Poissy. Tél : 01 39 22 38 00. Fax : 01 39 65 38 08)	
Groupe Leader 68 Bd J. Durand - 76056 Le Havre Cedex - tél : 02 43 84 68 80 - Fax : 02 35 53 16 32 - email : 100303.3634@compuserve.com - http://www.groupe-leader.fr	
Gruter & Marchand 22/24, rue Lavoisier - 92 000 Nanterre - Tél : 01 47 21 56 81 - Fax : 01 47 25 07 75	
Hach Europe S.A. N.V.BP 229, B-5000, Namur - Belgique - Tél. : (32) 81 44 53 81 - Fax : (32) 81 44 13 00 - http://www.hach.com	PROLABO 54 rue Roger Salengro - 94126 Fontenay-sous-Bois - Tél 01 45 14 87 41 - Fax : 01 45 14 86 42
Hanna	Bioblock scientific région nord 1 rue Jacques Prévert - 59650 Villeneuve d'Ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16 - e-mail: infos@bioblock.fr - http://www.bioblock.fr
HNU Systems, Inc. 160 Charlemont Street, Newton, MA 02161-9987 - USA - Tél : (1) 617 558-0103 - Fax: (1) 617 558-0056 - http://www.hnu.com	HNU Systems BP 355 - 91 959 Courtaboeuf Cedex - Tél : 01 64 46 77 96 - Fax : 01 64 46 77 99 - email : xm.hnusystems@wanadoo.fr
Horiba email : info@had.horiba.com http://www.horiba.com	Horiba France Rue L. et A. Lumière - Technoparc - 01630 St-Genis-Pouilly - Tél : 04 50 42 27 63 - Fax : 04 50 42 07 74
Hydrion Vadaring 70-B PO Box 522 - NL 6700 AM Wageningen - Tél : (31) 317 497658 - Fax : (31) 317 49782)	
Hydro-environnement (Groupe Environnement) 111 Bd Robespierre - 78 300 Poissy - Tél. : 01 39 22 38 38 - Fax : 01 39 65 38 08	

Société conceptrice	Société distributrice
Hydrolab corporation PO Box 50116 - Austin, TX - 78763 USA - Tél : (1) 512 255 8841 - Fax : (1) 512 255 3106 - http://www.hydrolab.com	Martec 5, rue Carle-Vernet - 92310 SEVRES - Tél: 01 46 23 79 09 - Fax : 01 46 26 55 55 - email : christia@martec.fr
Icare ZI de St Mitre - Av. de la Roche Fourcade - 13400 Aubagne - Tél : 04 42 18 06 00 - Fax : 04 42 18 06 00	
Idronaut Via Monte Amiata, 10 - 20047 BRUGHERIO - Italia - Tél : (039) 883832 - Fax : (039)883382 - email : idronaut@askesis.it	
Innova AirTech Instruments http://www.innova.dk	Brüel & Kjaer France 46, rue du champoreux - BP 33 - 91541 Mennecy Cedex - Tél : 01 69 90 69 00 - Fax : 01 64 57 24 19
Inventive Systems Inc. P.O. Box 220, Lexington Park, MD 20653, USA - Tél : (1) 301 863-5153 - Fax :(1) 301 863-7583 - email : wborland@eagle1.eaglenet.com orhttp://www.eaglenet.com/wborland/home.html	D2E 60 Ter rue de Bellevue - 92100 Boulogne - Tél. : 33.01.46.99.95.95 - Fax : 33.01.46.99.11.00 - email :info@d2e.com - http://www.d2e.com
Ionics email : eac@wtn.ionics.com - http://wwwionics.com	Techmation 81 rue Pierre sémard, BP 22 - 92321 Chatillon Cedex - Tél : 01 41 17 74 00 - Fax : 01 41 17 74 11
IRIS instruments 1, avenue Buffon - BP 6007 - 45060 Orléans cedex 2 - Tél : 02 38 63 81 00 fax : 02 38 63 81 82	
Isco, inc. 531 Westgate Blvd., Lincoln, NE 68528-1586, USA - Tél. : (1) 402 474 2233 - Fax : 458 8801 - email : info.pmd@isco.com - http://www.isco.com	Panametrics SA 11 rue du renard - BP 106 - La Garenne Colombes Cedex - Tél. : 01 47 82 42 81 - Fax : 01 47 86 35 62
J.U.M. Engineering Ges.m.b.H. Liebigstr. 13, D-85757 Karlsfeld Tél : (49) 8131-50416 - Fax: (49) 8131-98894 - e-mail: jum_eng@compuserve.comhttp://www.jum.com	Maihalk France sarl 5 bis rte de Saint Leu, 95 360 Montmagny . Tél : 01 34 17 77 05. Fax : 01 34 17 73 16.
Jenway Tél. : (44) (0)1371 820122 - Fax: +44 (0)1371 821083 - email: info@jenway.com - http://www.jenway.com	InforLab Chimie 2 allée des hirondelles - BP 212 - 77646 Chelles Cedex - Tél : 01 60 08 28 29 - Fax : 01 60 08 80 56.
Kyoritsu Chemical-Check Lab. Corp., 37-11, Den-Enchofu 5 Chome, Ohta-Ku, Tokyo 145 - Japon	Equipements Scientifiques S.a. Département BIO-TESTS, 127 rue de Buzenval, BP 26 - 92 380 Garches - Tél. : 01 47 95 99 00 - Fax : 01 47 41 08 33
LAR Tempelhofer Ufer 23-24, D-10963 Berlin, Allemagne - Tél : (49) 30 235 532 0 - Fax : (49) 30 216 200 4 - email : export@lar.mhs.compuserve.com - http://www.lar.com	Roucaire 2 avenue du Pacifique, Les Ulis - BP 78 - 91 943 Courtaboeuf Cedex - Tél : 01 69 86 21 21 - Fax : 01 69 86 21 31Sapc MéditerranéeParc d'activité de Fontvieille - Lot C - 13 190 Allauch - Tél. : 04 91 68 21 24 - Fax : 04 91 68 20 64
Laser Labor Adlershof e.V. (LLA) An-Institut der FHTW Berlin - Rudower Chaussee 6 , Geb. 19.7 - 12484 Berlin - Allemagne - Tél. : (49) 30 6392-4760 - Fax: (49) 30 6392-4766 - email : lla.analytik@t-online.de - http://www.wista.de/hp/llad.h	ISMA s.n. Rue Hector Malot - 57 600 Forbach - Tél : 03 87 87 62 16 - Fax : 03 87 88 18 59 - email : Isma@wanadoo.fr

Société conceptrice	Société distributrice
Macherey-Nagel S.a.r.l. 1, rue Gutenberg - BP 135 - 67722 Hoerdt - Tél. : 03 88 51 79 88 - Fax : 03 88 51 76 88 - email : 106554.3071@compuserve.com - http://www.macherey-nagel.com	Fisher Scientific -OSI BP 2 - 78 996 Elancourt Cedex - Tél. : 01 30 13 26 59 - Fax : 01 30 13 25 66
Merck Clévenot S.A. Département Environnement, 5 à 9 rue Anquetil - 94 736 Nogent-sur-Marne Cédex - Tél. : 01 43 94 54 00 - Fax : 01 48 76 58 15	
Metrohm http://www.metrohm.ch	ROUCAIRE SA 2, Avenue du PacifiqueLes ulis B.P. 78 91943 Courtaboeuf-CedexTél : 01 69 86 21 21Fax : 01 69 86 21 38 E-Mail: metrohm@roucaire.fr
Mettler-Toledo http://mettler.com	Mettler-Toledo S.A. B.P. 14 - 18-20, av. de la Pépinière - 78220 Viroflay - Tél : 01 30 97 17 17 - Fax: 01 30 97 16 16
Millipore S.A. BP 307 - 78054 St Quentin en Yvelines Cedex - Tél. : 01 30 12 70 00 - Fax : (1) 30 12 71 80 http://www.bis.med.jhmi.edu/Dan/catal/milli	Rhône Diagnostics Technologies Parc d'affaires de Crécy - Bât. 17 - 69370 Saint Didier au Mont D'or - Tél. : 04 78 64 32 00 - Fax : 04 78 47 84 04
Mil-Ram 2360 Qume Drive, Suite C, San Jose, Ca 95131 - USA - Tél : (1) 408 324 0660 - Fax : (1) 408 324 1661 - http://www2.mil-ram.com	
MOBREY S.A. 4, rue Paul Painlevé, Z.I. Le Vert Galant - 95310 St-Ouen-l'Aumone représentant dans le Nord, Tél/FAx : 03 20 11 24 94)	
Ohmicron Corporation Environmental Diagnostics, Sales Department, 375 Pheasant Run , Newtown , PA , 18940 , USA - Tél. : (1) 215-860-5115 - Fax : (1) 215-860-5213	JT Baker France Le Floréal - 9 rue St Just - 93 135 Noisy Le Sec Cedex - Tél. : 01 48 44 65 44 - Fax : 01 48 44 65 18 PROLABO 54,rue Salengro - 94 126 Fontenay-sous-Bois Cedex - Tél : 01 45 14 85 00 - Fax : 01 45 14 85
Oldham France sa Service détection de gaz - ZI Est - Rue Alexander Fleming - BP 962 - 62033 Arras - Tél : 03 21 60 25 20 - Fax : 03 21 60 26 60	
Orion Research Inc. http://www.orionres.com	PROLABO 54,rue Salengro - 94 126 Fontenay-sous-Bois Cedex - Tél : 01 45 14 85 00 - Fax : 01 45 14 85
Palintest House Kingsway, Team Valley, Gateshead, Tyne & Wear - Angleterre - Tél. : (44) 191 491 0808 - Fax : (44) 191 482 5372 - email : palintest@palintest.com - http://www.palintest.com	Bioblock Scientific région Nord 1 rue Jacques Prévert - 59650 Villeneuve d'Ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16 - e-mail: infos@bioblock.fr - http://www.bioblock.fr
PE PHOTOVAC 330 Cochrane Drive, Markham, Ontario L3R 8E5 - Canada - Tél : (1) 905 477 8088 - Fax : (1) 905 477 8220 - http://www. perkin-elmer.com	Autochim 55 rue de l'aubépine, 92 160 Antony. Tél : 01 40 96 11 22. Fax : 01 40 96 11 30
Pollution Control System	Martec 5, rue Carle-Vernet - 92310 SEVRES - Tél: 01 46 23 79 09 - Fax : 01 46 26 55 55 - email : christia@martec.fr
Ponselle Mesure 14 avenue de la pépinière ZAE - 78220 Viroflay - Tél. : 01 30 24 62 62 - Fax : 01 30 24 31 85	

Société conceptrice	Société distributrice
Randox Laboratories Ltd. Diamond Road, Crumlin County Antrim, Northern Ireland United Kindom BT29 4QY Tél. : (44) 1849 422413 - Fax : (44) 1849 452912 - email : randox@compuserve.com - http://ourworld.compuserve.com/homepages/randox	Randox Laboratories 69 rue de la belle étoile, Bât. G, ZAC Paris Nord II - BP 50037 - 95 946 Roissy CDG - Tél. : 01 48 63 74 28 - Fax : 01 48 63 74 29
Rae Systems Inc. 680 West Maude Avenue #1, Sunnyvale, CA 94086, USAhttp://www.raesystems.com	Panametrics 11 rue du Renard - 92 250 La-Garenne-Colombes - Tél :01 47 82 42 81 - fax : 01 47 86 35 62
Schott France Département Laboratoire - 8 rue Fournier - 92 110 Clichy - Tél : 01 42 70 14 18 - fax : 01 42 70 73 22	PROLABO 54,rue Salengro - 94 126 Fontenay-sous-Bois Cedex - Tél : 01 45 14 85 00 - Fax : 01 45 14 85
	SDEC France ZI de la gare - 37 310 Reignac sur Indre Tel : 02 47 94 10 00 – Fax 02 47 94 17 43 http;//www.sdec-france.com
Seconam 4, rue des Charpentiers - 95 335 Domont Cedex - Tél : 01 39 35 42 00 - Fax: 01 39 91 30 18	
Seres 360 rue Louis de Broglie - La Duranne - BP 87000 - 13793 Aix-En-Provence - Tél : 04 42 97 37 07 Fax : 04 42 97 30 30	
Siemens http://www.siemens.de	Siemens France 39-47, bd Ornano 93 527 Saint-Denis Cedex 2 - Tél : 01 49 22 31 00 - Fax : 01 49 22 34 13 PROLABO 54,rue Salengro - 94 126 Fontenay-sous-Bois Cedex - Tél : 01 45 14 85 00 - Fax : 01 45 14 85
Signal Instruments Company Limited Standards House, Doman Road, Camberley, Surrey GU15 3DW, England - Tél : (44) 1 276 682841 - Fax : (44) 1276 691302	Panametrics 11 rue du Renard - 92 250 La-Garenne-Colombes - Tél :01 47 82 42 81 - fax : 01 47 86 35 62
Solomat Néotronics 33 rue du Ballon - 93165 NOISY-LE-GRAND Cedex - Tél : 01 48 15 68 40- Fax : 01 48 15 80 00	
STIP Siemensstrasse 2, D-64823 Gross-Umstadt - Allemagne - Tél : (49) 60 78 786 0 - Fax : (49) 6078 786	Techmation 81 rue Pierre sémard, BP 22 - 92321 Chatillon Cedex - Tél : 01 41 17 74 00 - Fax : 01 41 17 74 11
Tacussel email: radiometer@nalytical.comhttp://www.tacussel.com/	Radiometer Analytical S.A. 72, rue d'Alsace69627 Villeurbanne CEDEXFranceTél : 04 78 03 38 38Fax : 04 78 68 88 12
Testo SRI Nord - 36, rue George Sand - 62575 Blendecques - Tél : 03 21 38 06 65 - Fax : 03 21 39 75 82 - http://www.testo.fr	
TQ Environmental Ltd Flanshaw Way, Wakefield, West Yorkshire WF2 9LP England - Tél : (44) 1924 380700 - Fax : (44) 1924 361700 - email : 106325..3121@compuserve.com	
Trace analytical 3517-A Edison Way - Memlo Park - Ca 94025 - USA - Fax : (1) 415 364 6897 - email : sales@traceanalytical.com - http://www.traceanalytical.com	

Société conceptrice	**Société distributrice**
Turner Designs Inc. 845 W. Maude Avenue, Sunnyvale, CA 94086Tél : (1) 408 749-0994 - Fax: (1) 408 749-0998email : sales@turnerdesigns.com - http://www.turnerdesigns.com	Techmation 81 rue Pierre sémard, BP 22 - 92321 Chatillon Cedex - Tél : 01 41 17 74 00 - Fax : 01 41 17 74 11
Tytronics Inc. 25 Wiggins Avenue, Bedford, MA 01730-2323, USA - Tél. : (1) 781 275-9660 - Fax : (1) 781 275-9665 - email : info@tytronics.com - http://www.tytronics.com	Roucaire 2 avenue du Pacifique, Les Ulis - BP 78 - 91 943 Courtaboeuf Cedex - Tél : 01 69 86 21 21 - Fax : 01 69 86 21 31
VerdEco Technologies Ltd. PO Box 258, Yoqneam, 20692 Israel - Tél. : (972) 4 9599520 - Fax : (972) 4 9590722 - email : info@verdeco.co.il - http://www.verdeco.co.il	RMP Polytec -PI SA 32 rue Delizy - 93 694 Pantin Cedex 6 T él. : 01 48 10 39 30 - Fax : 01 48 10 08 03
WTW GmbH Dr. rer. nat. K. Slevogt, D-82362 Weilheim, Allemagne - Tél. : (49) 08 81 183-0 - Fax : (49) 08 81 625 39 - http://www.wtw.de	WTW France S.a.r.l. 1 rue des Vergers - 69 760 Limonest - Tél. : 04 78 43 22 96 - Fax : 04 78 43 21 38
Weltlabs PO Box 518 - Philomath, OR 97370 - USA - Tél : (1) 541 929 5650 - Fax : (1) 541 929 5277 - email : wetlabs@wetlabs.com - http://www.wetlabs.com	Martec 5, rue Carle-Vernet - 92310 SEVRES - Tél: 01 46 23 79 09 - Fax : 01 46 26 55 55 - email : christia@martec.fr
Ysi (cf ci-dessous)/Grant Instruments (Barrington, Cambridge, CB2 5QZ, Angleterre - Tél : (44) 763 260811 - Fax : (44) 763 262410	Bioblock Scientific région Nord 1 rue Jacques Prévert - 59650 Villeneuve d'Ascq - Tél : 03 20 47 19 71 - Fax : 03 20 47 12 16 - e-mail: infos@bioblock.fr - http://www.bioblock.fr
YSI Incorporated Yellow Springs, Ohio 45387 USA - Tél : (1) 937 767-7241 - Fax : (1) 937 767-9353http://www.Ysi.com	ROUCAIRE SA 2, Avenue du Pacifique, Les ulis, B.P. 78 - 91943 Courtaboeuf-Cedex - Tél : 01 69 86 21 21 - Fax : 01 69 86 21 38
Zellweger Analytics http://www.zealana.com	Zellweger Analytics 33 rue du Ballon - 93165 Noisy-Le-Grand Cedex - Tél : 01 48 15 80 80 - Fax : 01 48 15 80 00

Concentrations en HAP [µg/L] mesurées dans les piézomètres Pz9A - Pz18A - Pz19A

Annexe 16

CNRSSP

Septembre 2000

Analyses de mars 2000

Composés [µg/L]	Pz19A	Pz18A	Pz9A
Naphtalène	0,022	0,019	0,028
Acénaphtylène	0,000	0,000	0,000
Acénaphtène	0,008	0,011	0,015
Fluorène	0,012	0,031	0,020
Phénanthrène	0,075	0,033	0,086
Anthracène	0,035	0,102	0,034
Fluoranthène	0,128	0,026	0,106
Pyrène	0,093	0,023	0,077
Benzo(a)anhtracène	0,079	0,013	0,057
Chrysène	0,055	0,008	0,040
Benzo(b)fluoranthène	0,000	0,000	0,000
Benzo(k)fluoranthène	0,041	0,000	0,028
Benzo(a)pyrène	0,080	0,000	0,052
Dibenzo(a,h)anthracène	0,001	0,000	0,006
Benzo(g,h,i)pérylène	0,055	0,000	0,042
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,054	0,008	0,031
Somme	**0,738**	**0,273**	**0,624**

Analyses de mai 2000

Composés [µg/L]	Pz19A	Pz18A	Pz9A
Naphtalène	0,012	0,051	0,036
Acénaphtylène	0,000	0,000	0,000
Acénaphtène	0,000	0,107	0,000
Fluorène	0,022	0,057	0,012
Phénanthrène	0,093	0,024	0,021
Anthracène	0,069	0,008	0,010
Fluoranthène	0,222	0,000	0,029
Pyrène	0,120	0,012	0,015
Benzo(a)anhtracène	0,188	0,009	0,015
Chrysène	0,200	0,007	0,013
Benzo(b)fluoranthène	0,000	0,000	0,000
Benzo(k)fluoranthène	0,079	0,000	0,000
Benzo(a)pyrène	0,165	0,010	0,020
Dibenzo(a,h)anthracène	0,027	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)pérylène	0,125	0,000	0,000
Indeno(1,2,3-cd)pyène	0,095	0,000	0,000
Somme	**1,415**	**0,283**	**0,171**

Analyses de juillet 2000

Composés [µg/L]	Pz19A	Pz18A	Pz9A
Naphtalène	0,042	0,011	0,004
Acénaphtylène		0,000	0,000
Acénaphtène	0,022	0,003	0,004
Fluorène	0,035	0,005	0,006
Phénanthrène	0,075	0,013	0,012
Anthracène	0,019	0,003	0,002
Fluoranthène	0,467	0,016	0,009
Pyrène	0,023	0,008	0,004
Benzo(a)anhtracène	0,019	0,006	0,004
Chrysène	0,016	0,005	0,002
Benzo(b)fluoranthène		0,006	0,003
Benzo(k)fluoranthène		0,000	0,000
Benzo(a)pyrène		0,005	0,000
Dibenzo(a,h)anthracène		0,000	0,000
Benzo(g,h,i)pérylène	0,013	0,005	0,000
Indeno(1,2,3-cd)pyène		0,003	0,000
Somme	0,733	**0,091**	**0,050**

Evolution dans le temps de la fluorescence UV de l'eau brute suivant le mode de conservation de l'échantillon

Annexe 17

CNRSSP

2002

Pour le suivi de l'évolution dans le temps de la fluorescence UV dans l'eau brute, il a été prélevées plusieurs échantillons dans les piézomètres Pz9, Pz18 et Pz19.

Chaque échantillons ont été conservé dans différentes conditions avec un prélèvement régulier pour analyse par fluorescence. 4 configurations ont été reproduites :

- eau brute laissée en chambre froide et mesure dès sa sortie : [F-TF] ;
- eau brute laissée en chambre froide et mesure après retour à température ambiante : [F-Ta];
- eau brute laissée à température ambiante et à la lumière : [Ta-L] ;
- :eau brute laissée à température ambiante et à l'abri de la lumière [Ta-o].

F = chambre froide ;
TF = température de la chambre froide
Ta = température ambiante
L = lumière
o = obscurité,

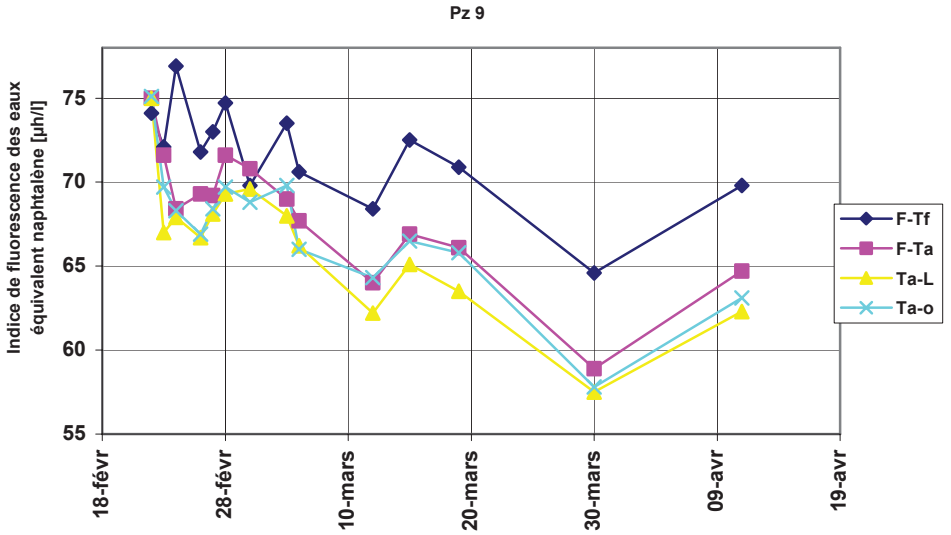
Les résultats de ces mesures se trouvent dans le Tableau 16

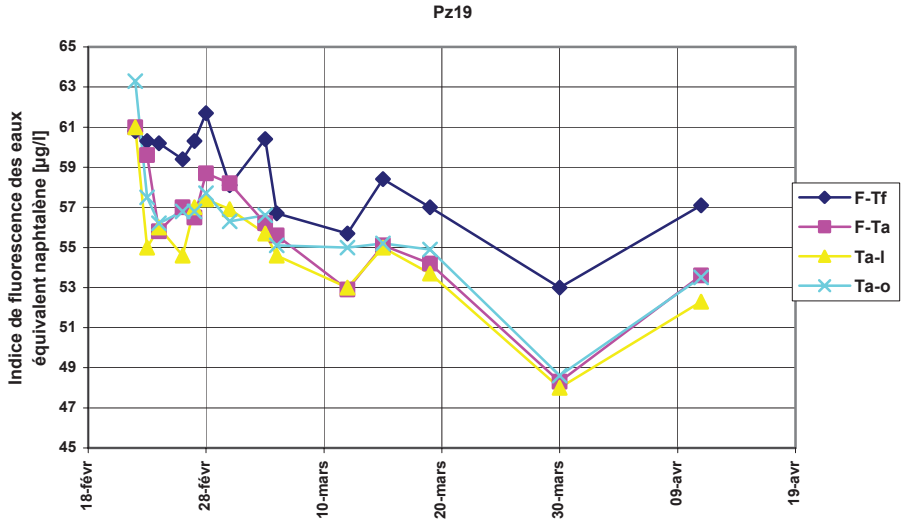
Tableau 16 : *Résultats des analyses de fluorescence en fonction de la température et des conditions de conservation de l'échantillon pour les Pz9, Pz18 et Pz19*

Pz9	T ° C	Pz9F-TF	T ° C	Pz9F-Ta	T ° C	Pz9Ta-L	T ° C	Pz9Ta-O
23-févr	14.4	72.1	16.5	71.6	18.7	67	18.0	69.7
24-févr	12.0	76.9	16.7	68.4	18.3	67.9	17.6	68.3
26-févr	13.6	71.8	16.0	69.3	17.3	66.7	17.0	66.9
27-févr	13.0	73	17.3	69.2	18.3	68.1	16.8	68.4
28-févr	12.9	74.7	15.6	71.6	17.1	69.3	16.8	69.7
2-mars	15.8	69.8	16.2	70.8	18.0	69.6	18.4	68.8
5-mars	13.8	73.5	17.0	69	17.9	68	16.9	69.8
6-mars	15.1	70.6	16.6	67.7	18.4	66.2	17.8	66
12-mars	15.2	68.4	18.7	64	20.0	62.2	19.1	64.3
15-mars	14.6	72.5	17.8	66.9	18.7	65.1	17.9	66.5
19-mars	13.6	70.9	17.6	66.1	18.8	63.5	17.4	65.8
30-mars	18.9	64.6	22.0	58.9	22.1	57.5	21.4	57.8
11-avr	14.5	69.8	18.4	64.7	19.1	62.3	18.4	63.1

Pz19	T ° C	Pz19F-TF	T ° C	Pz19F-Ta	T ° C	Pz19Ta-L	T ° C	Pz19Ta-O
23-févr	13.8	60.3	15.4	59.6	17.9	55	16.9	57.5
24-févr	13.6	60.2	17	55.8	18.3	56	17.7	56.2
26-févr	14.7	59.4	16.2	57	17.6	54.6	16.5	56.8
27-févr	14.6	60.3	16.6	56.5	18.2	57	17.3	56.8
28-févr	13.4	61.7	16	58.7	17.3	57.4	16.7	57.7
02-mars	15.6	58.1	16.6	58.2	18.7	56.9	18.7	56.3
05-mars	14.0	60.4	17	56.2	17.4	55.7	17.1	56.6
06-mars	15.8	56.7	17	55.6	18.8	54.6	17.9	55.1
12-mars	15.5	55.7	18.8	52.9	20.4	53	18.8	55
15-mars	15.5	58.4	18.2	55.1	18.5	55	18.3	55.2
19-mars	15.4	57	17.8	54.2	18.8	53.7	17.3	54.9
30-mars	16.5	53	21.9	48.3	22.4	48	21.0	48.6
11-avr	15.1	57.1	18.7	53.6	19.1	52.3	18.7	53.5

Pz18	T ° C	Pz18F-TF	T ° C	Pz18F-Ta	T ° C	Pz18Ta-L	T ° C	Pz18Ta-O
23-févr	13.8	59.3	14.8	57.1	18.4	55.4	17.1	56.5
24-févr	15.0	58.3	17.0	55.2	18.3	54.9	17.6	55.3
26-févr	13.2	59.2	17.1	55.5	17.7	53.4	16.6	54.7
27-févr	13.0	58.7	16.6	54.3	17.9	54.4	16.8	55.4
28-févr	14.1	59.5	15.6	57.4	17.1	55.1	16.6	55.6
02-mars	15.9	56.5	17.2	56	18.6	53.2	18.6	54.7
05-mars	14.6	59.8	16.9	55.4	18.2	52.6	17.2	55.2
06-mars	16.2	56.9	16.4	54.7	19.4	51.1	17.7	52.5
12-mars	17.1	55.1	18.7	51.4	20.0	47.9	18.7	50.9
15-mars	14.8	57.7	17.9	53.6	18.3	50.4	18.2	52.3
19-mars	13.9	57.6	18.2	52.4	19.0	49.4	17.4	52.2
30-mars	17.0	52.6	21.9	47	22.3	43.6	21.3	46
11-avr	16.5	55.4	17.8	52	19.1	48	18.6	49





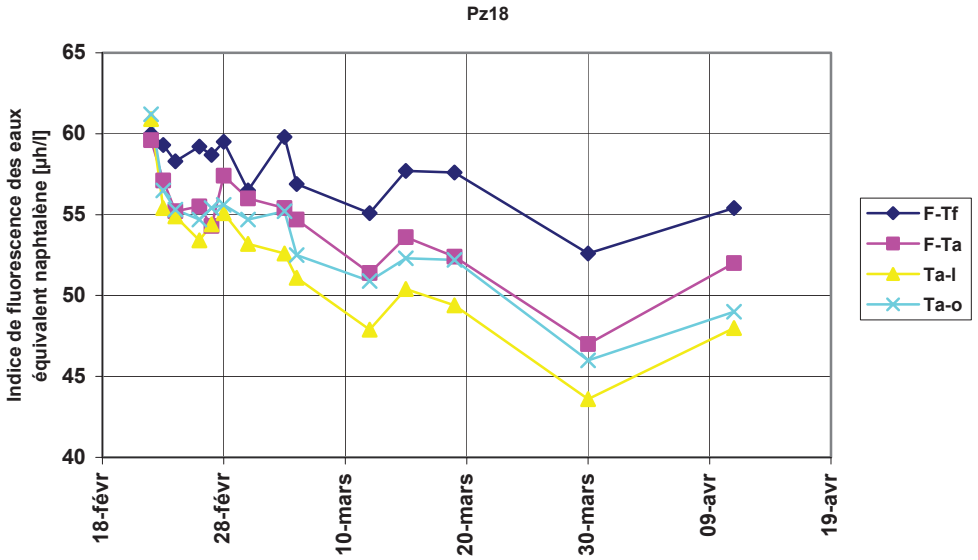


Figure 105 : *Evolution de l'indice de fluorescence dans le temps en fonction du mode de conservation pour les Pz9, Pz18 et Pz19*

On remarque sur la Figure 105 que l'évolution des mesures est identique pour les trois piézomètres quel que soit le mode de conservation de l'eau brute. Par contre, les variations constatées semblent liées aux différences de température lors de la mesure comme le montre la Figure 106 : quand la température augmente fortement la fluorescence diminue et inversement.

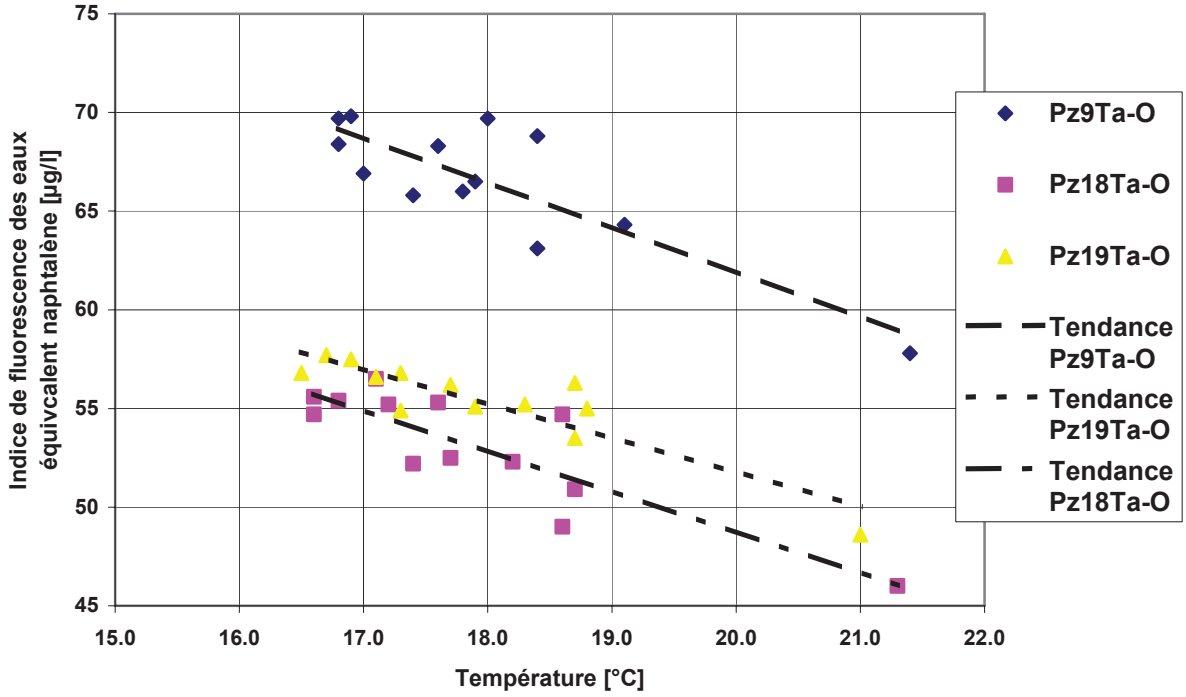


Figure 106 : *Evolution de la fluorescence en fonction de la température de l'échantillon. Cas d'une conservation à température ambiante dans l'obscurité'*

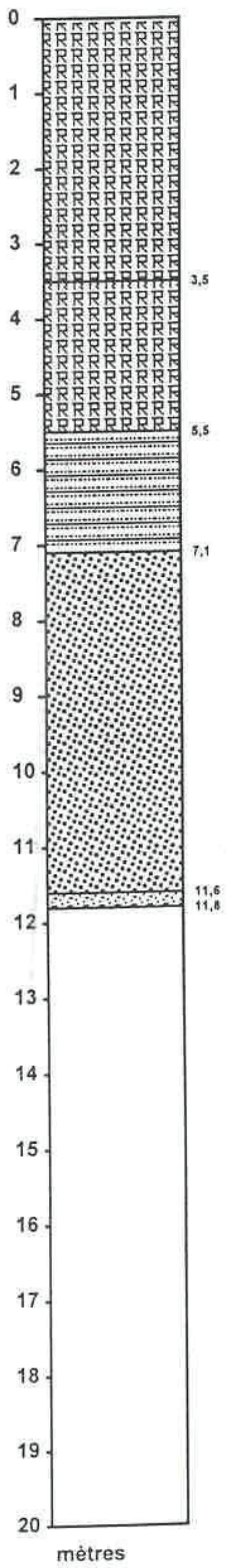
Sondages piézométrique Pz9A, Pz18A et Pz19A

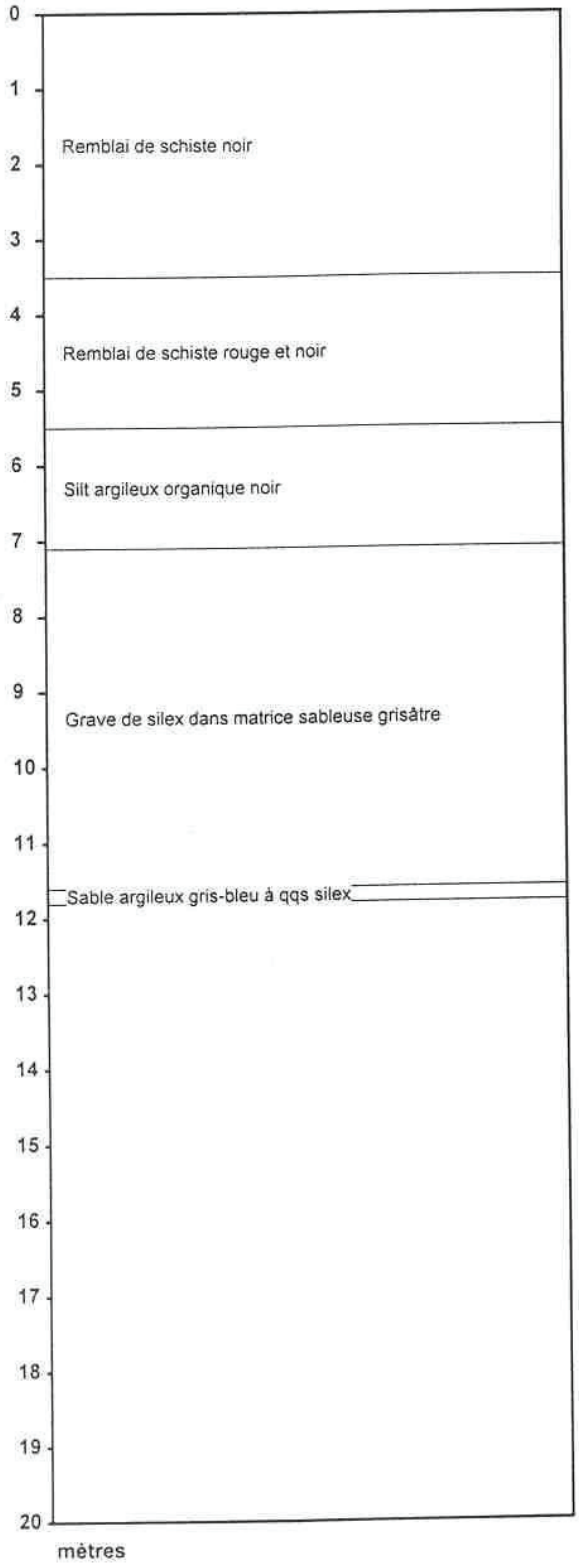
Annexe 18

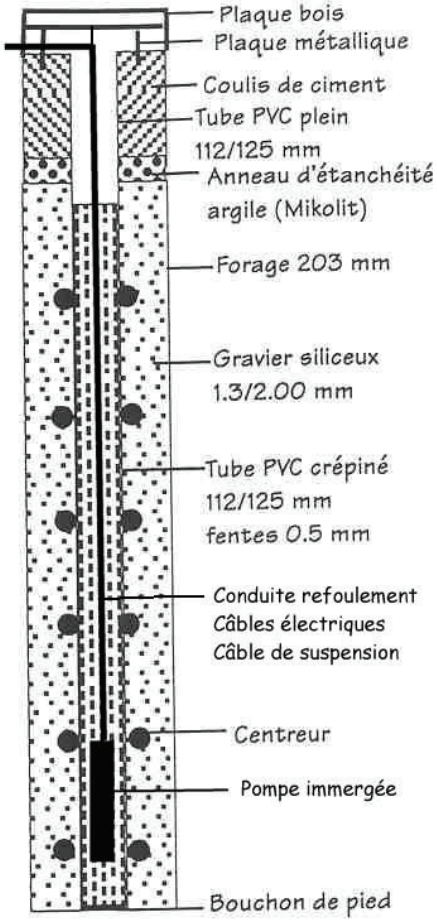
Entreprise de forage

Septembre 2000

SONDAGE PIEZOMETRIQUE Pz18A





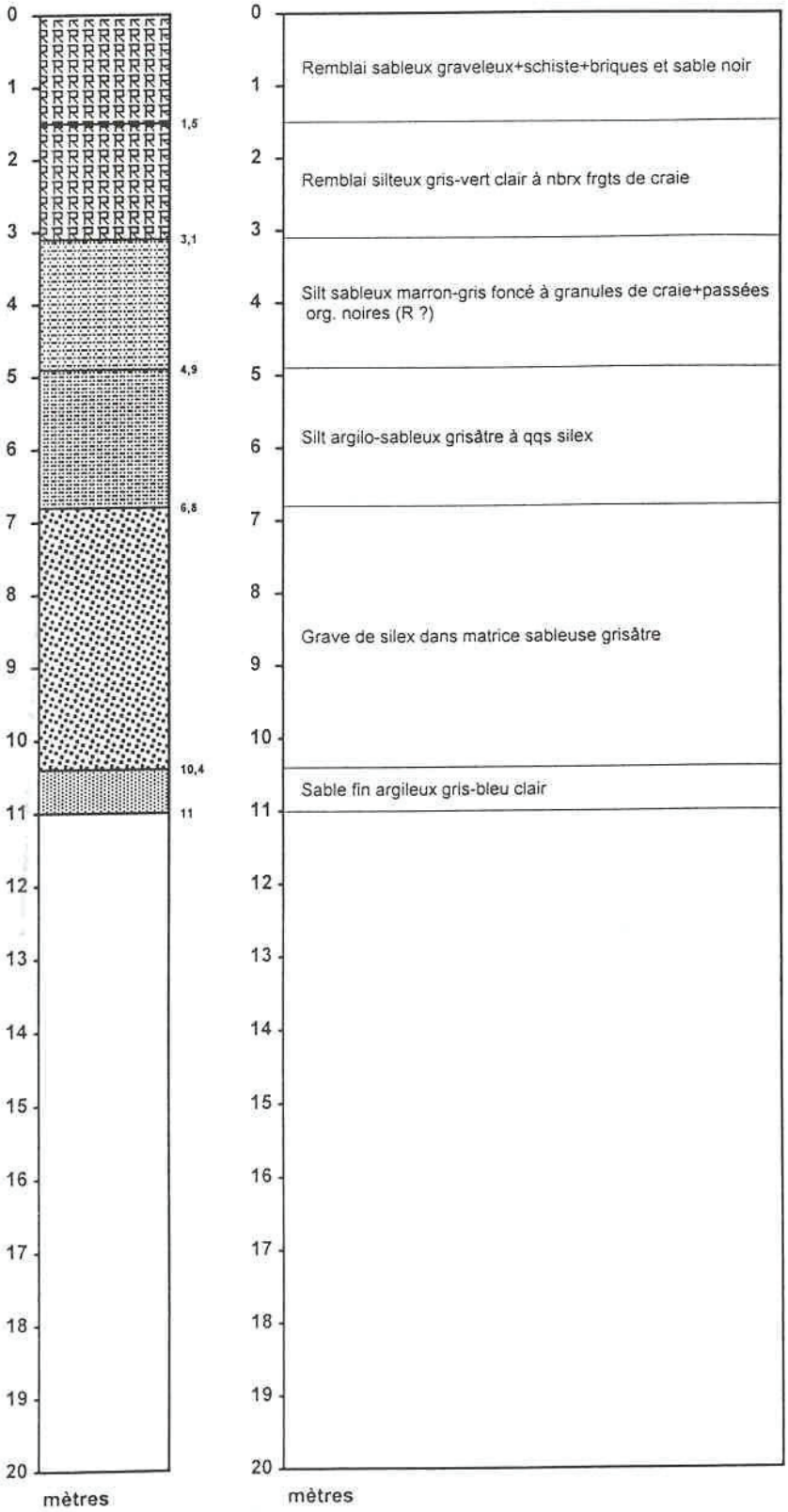


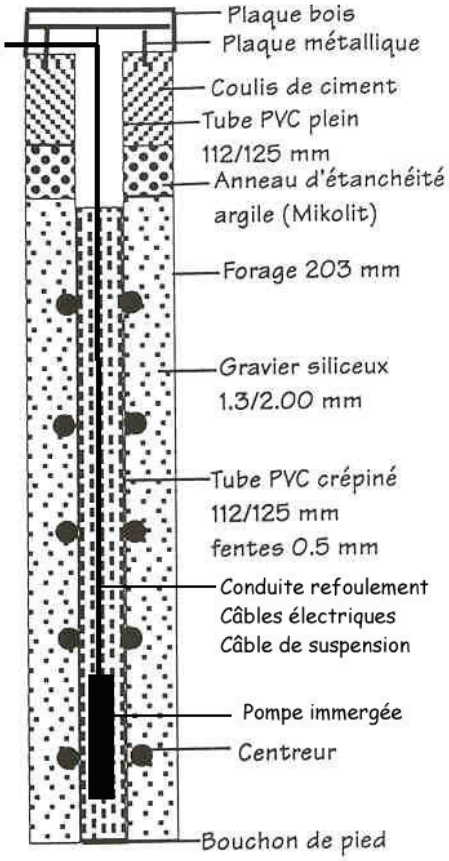
- Pompage de nettoyage le 06/03/2000 :

- Air-lift :
. niveau d'eau avant air-lift : - 4.53 m/sol
. durée : 0 h 30 mn
. fond du piézomètre avant air-lift : - 9.70 m/sol
. fond du piézomètre après air-lift : - 11.55 m/sol
. eau verdâtre au début devenant claire ensuite

- Pompage :
. pompe Grunfos
. profondeur de la pompe : - 10.30 m/sol
. niveau avant pompage : - 4.54 m/sol
. débit : 4.72 m3/heure
. durée : 1 heure
. eau claire
. Niveau d'eau en fin de pompage : - 4.58 m/sol

SONDAGE PIEZOMETRIQUE Pz19A



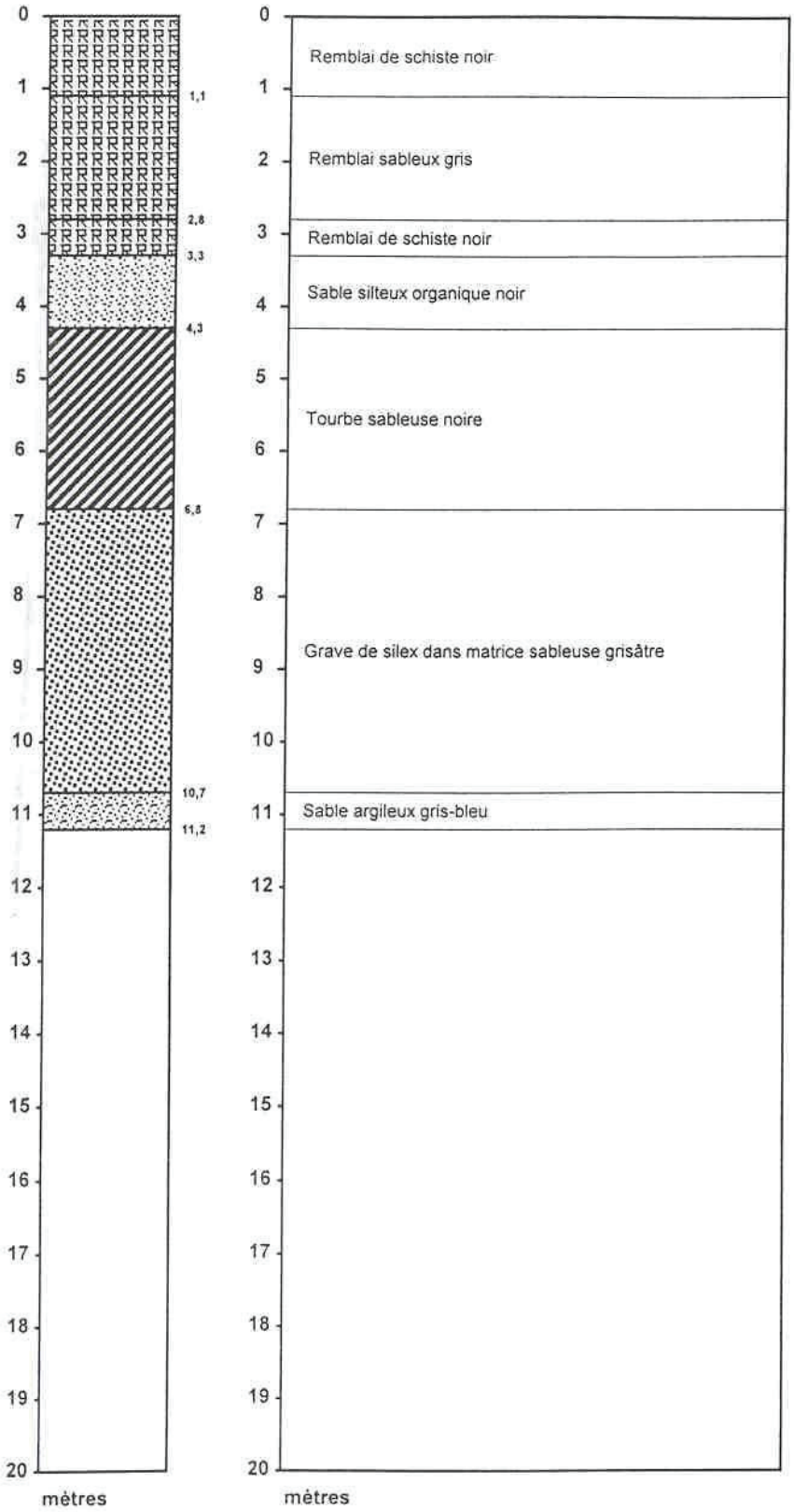


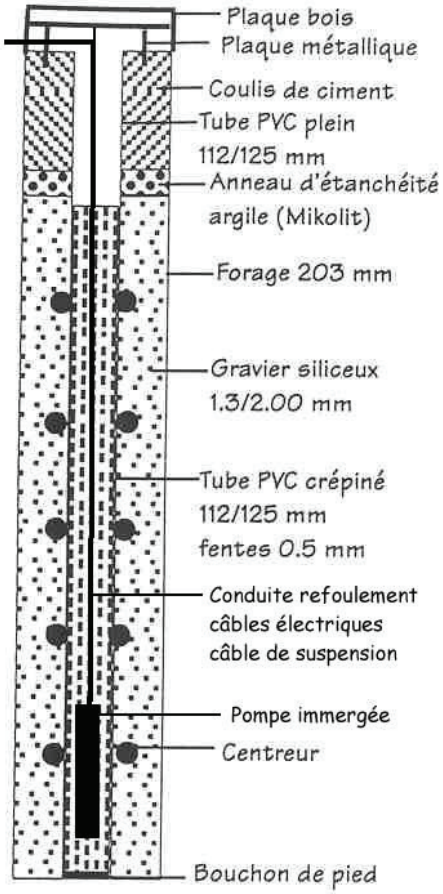
- Pompage de nettoyage le 03/03/2000 :

- Air-lift :
. niveau d'eau avant air-lift : - 3.43 m/sol
. durée : 0 h 30 mn
. fond du piézomètre avant air-lift : - 9.75 m/sol
. fond du piézomètre après air-lift : - 10.75 m/sol
. eau verdâtre au début devenant claire ensuite

- Pompage :
. pompe Grunfos
. profondeur de la pompe : - 10.30 m/sol
. niveau avant pompage : - 3.42 m/sol
. débit : 4.81 m3/heure
. durée : 1 heure
. eau claire
. Niveau d'eau en fin de pompage : - 3.62 m/sol

SONDAGE PIEZOMETRIQUE Pz9A





- Pompage de nettoyage

- Air-lift :
. niveau d'eau avant air-lift : - 2.89 m/sol
. durée : 0 h 30 mn
. fond du piézomètre avant air-lift : - 9.70 m/sol
. fond du piézomètre après air-lift : - 10.80 m/sol
. eau verdâtre au début devenant claire ensuite

- Pompage :
. pompe Grunfos
. profondeur de la pompe : - 9.60 m/sol
. niveau avant pompage : - 2.89 m/sol
. débit : 4.18 m3/heure
. durée : 1 heure
. eau claire
. Niveau d'eau en fin de pompage : - 2.96 m/sol

Grafcet des automatismes
Programmation de l'automate

Annexe 19

CNRSSP

Septembre 2000

						9 CT8 CT16	1 CT1	6 CT5	10 CT9 CT17	2 CT2	7 CT7	D1 CT10 CT18	3 CT3	8 CT7	4 CT4	5 CT13	D2 CT19	D3 CT14	D4 CT15
Pz18A à PARTIR DE				**3:00**															
Ouverture Ev rPz18A	1	**9**	CT8	3:00	3.00	1													
Démarrage Ppe Pz18A A	2	**1**	CT1	3:00	3.00		1												
Temporisation 1h																			
Ouverture Ev Pz18A	3	**6**	CT5	4:00	4.00			1											
Fermeture Ev rPz18A		**9**		4:00	4.00	0													
Temporisation 1h																			
Arrêt Ppe Pz18A		**1**		4:57	4,95		0												
Fermeture Ev Pz18A		**6**		4:57	4,95			0											
Démarrage Ppe R	4	**4**	CT4	4:57	4,95										1				
Arrêt Ppe R		**4**		5:00	5.00										0				
Pz19A à PARTIR DE				**5:00**															
Ouverture Ev rPz19A	5	**10**	CT9	5:00	5.00				1										
Démarrage Ppe Pz19A	6	**2**	CT2	5:00	5.00					1									
Temporisation 1h																			
Ouverture Ev Pz19A	7	**7**	CT6	6:00	6.00						1								
Fermeture Ev rPz19A		**10**		6:00	6.00				0										
Temporisation 1h																			
Arrêt Ppe Pz19A		**2**		6:57	6.95					0									
Fermeture Ev Pz19A		**7**		6:57	6.95						0								
Démarrage Ppe R	8	**4**	CT4	6:57	6.95										1				
Arrêt Ppe R		**4**		7:00	7.00										0				
Pz9A à PARTIR DE				**7:00**															
Ouverture Ev rPz9A	9	**D1**	CT10	7:00	7.00							1							
Démarrage Ppe Pz9A	10	**3**	CT3	7:00	7.00								1						
Temporisation 1h																			
Ouverture Ev Pz9A	11	**8**	CT7	8:00	8.00									1					
Fermeture Ev rPz9A		**D1**		8:00	8.00							0							
Tempotisation 1h																			
Arrêt Ppe Pz9A		**3**		8:57	8.95								0						
Fermeture Ev Pz9A		**8**		8:57	8.95									0					
Démarrage Ppe R	12	**4**	CT4	8:57	8.95										1				
Arrêt Ppe R		**4**		9:00	9.00										0				
GAZ A PARTIR DE				**9:45**															
Ouverture EV Purge	13	**D2**	CT19	9:45	9.75												1		
Démarrage Ppe Air	14	**5**	CT13	9:45	9.75											1			
G1 A PARTIR DE				**10:00**															
Ouverture Ev G1	15	**D3**	CT14	10:00	10.00													1	
Fermeture EV purge		**D2**		10:00	10.00												0		
G2 A PARTIR DE				**11:00**															
Ouverture Ev G2	16	**D4**	CT15	11:00	11.00														1
Fermeture Ev G1		**D3**		11:00	11.00													0	
G3 A PARTIR DE				**12:00**															
Ouverture Ev G3	17	**9**	CT16	12:00	12.00	1													
Fermeture Ev G2		**D4**		12:00	12.00														0
G4 A PARTIR DE				**13:00**															
Ouverture Ev G4	18	**10**	CT17	13:00	13.00				1										
Fermeture Ev G3		**9**		13:00	13.00	0													
G5 A PARTIR DE				**14:00**															
Ouverture Ev G5	19	**D1**	CT18	14:00	14.00							1							
Fermeture Ev G4		**10**		14:00	14.00				0										
PURGE A PARTIR DE				**15:00**															
Ouverture Ev Purge	20	**D2**	CT19	15:00	15.00												1		
Fermeture Ev G5		**D1**		15:00	15.00							0							
Arret Ppe Air		**5**		15:15	15.25											0			
Fermeture Ev Purge		**D2**		15:15	15.25												0		

Recueil des analyses journalières de mai 2000 à décembre 2001

Annexe 20

CNRSSP

Décembre 2001

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
23-mai-00	38		34		45																		
24-mai-00	32		28		36																		
25-mai-00	42		40		52																		
26-mai-00	36		34		48																		
27-mai-00																							
28-mai-00																							
29-mai-00																							
30-mai-00																							
31-mai-00																							
01-juin-00																							
02-juin-00																							
03-juin-00																							
04-juin-00																							
05-juin-00	7		9		11																		Maintenance
06-juin-00																							
07-juin-00																							
08-juin-00					73																		Maintenance
09-juin-00	51		71		72				14,3	4,8													
10-juin-00	51		68		71				13,4	5,4													
11-juin-00	50		66		70				13,4	5,5													Calib Naphta 137 -->253
12-juin-00	49		63		68				13,0	5,9													
13-juin-00	48		61		67				13,1	5,9													
14-juin-00	48		59		66				10,0	8,7													
15-juin-00	47		57		66				10,1	8,7													
16-juin-00	48		56		67				10,7	8,3													
17-juin-00	47		54		66				10,7	8,3													
18-juin-00	47		53		67				10,7	8,1													
19-juin-00	49		54		69				11,4	7,5													
20-juin-00	49		54		69				11,4	7,4													
21-juin-00	47		50		65				9,8	8,7													
22-juin-00	41		43		58				9,8	8,8													
23-juin-00	40		41		56				9,8	8,9													
24-juin-00	41		41		56				9,5	9,0													
25-juin-00	41		40		57				9,5	9,1													
26-juin-00	41		41		56				9,9	8,8													
27-juin-00	40		41		54				10,8	7,7													
28-juin-00	40		42		54								3,2	16,0									
29-juin-00	37		40		51								3,1	17,0									
30-juin-00	37		40		50								3,0	16,0									
01-juil-00	34		38		49								2,9	16,0									
02-juil-00	34		37		49								3,0	16,7									
03-juil-00	33		36		45								0,8	17,2									
04-juil-00	33		34		44								2,0	19,5									

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
05-juil-00	30		34		40								2,1	19,2									
06-juil-00	31		34		40								2,6	19,3									
07-juil-00	30		33		40								2,8	19,0									
08-juil-00	30		31		38								2,7	18,7									
09-juil-00	28		29		36								2,4	18,8									
10-juil-00	27		29		36																		
11-juil-00	26		30		37																		Maintenance le 11 juillet
12-juil-00	26		28		36																		
13-juil-00	23		27		31		18,9	2,2	12,2	7,2	18,1	1,9	5,6	14,6	18,1	2,1							
14-juil-00	23		27		31		18,8	2,3	11,9	7,3	18,1	1,8	5,5	14,5	17,8	2,3							
15-juil-00	22		25		30		18,8	2,2	12,6	6,8	18,2	1,7	5,3	14,3	17,9	2,3							
16-juil-00	22		24		29		18,6	2,3	12,7	6,7	18,3	1,7	5,0	14,3	17,9	2,3							
17-juil-00	22		24		29		18,6	2,3															
18-juil-00					29		18,5	2,4	13,7	6,1	18,3	1,8	5,9	14,4	17,7	2,3							
19-juil-00	21						18,5	2,3	12,8	6,6	18,0	1,9	4,9	15,1	19,1	1,6							Maintenance
20-juil-00			82		98		18,3	2,6	13,7	6,1	18,3	1,8	6,0	14,8	17,7	2,4							
21-juil-00	66		76		84		18,2	2,6	14,0	5,8	18,5	1,8	6,0	14,7	17,9	2,4							
22-juil-00	60		74		86		18,0	2,7	15,6	4,8	18,4	1,8	5,9	15,0	18,0	2,3							
23-juil-00	60		74		88		17,7	2,8	15,7	4,6	18,2	1,8	5,7	15,1	17,8	2,4							
24-juil-00	66		75		85		17,5	2,8	13,7	5,7	18,0	1,8	5,3	15,1	17,5	2,4							
25-juil-00	59		70		76		17,5	2,8	12,6	6,5	17,9	1,8	5,0	15,1	17,5	2,4							Maintenance
26-juil-00																							Maintenance
27-juil-00	66		73		77		17,5	2,7	13,4	5,6	18,0	1,9	5,9	15,1	19,3	1,9							
28-juil-00	60		69		73		17,6	2,7	12,5	6,3	17,9	2,3	5,9	15,1	17,5	2,3							
29-juil-00	63		70		73		17,5	2,7	12,4	6,5	17,8	2,3	4,1	15,5									Pb à G5
30-juil-00																							Pb partout jusqu'au 3/8
31-juil-00																							plus de courant
01-août-00																							
02-août-00																							
03-août-00							17,1	3,1	11,7	6,7	17,3	2,3	5,5	15,3	17,1	2,3					27,0	65,8	
04-août-00	58		65		71		17,1	3,1	12,1	6,5	17,6	2,3	5,9	15,3	17,1	2,7	1,6	1,6	22,5	84,8	27,8	66,6	
05-août-00	58		65		69		17,2	3,0	12,9	6,1	17,9	2,3	6,0	15,1	17,5	2,7	4,0	5,6	21,3	92,4	30,9	53,9	
06-août-00	60		65		68		17,1	3,1	12,5	6,4	17,9	2,3	5,9	15,3	17,6	2,7	0,4	6,0	22,7	90,8	31,5	63,3	
07-août-00	61		66		72		17,0	3,1	12,3	6,6	17,8	2,3	5,9	15,4	17,5	2,7		6,0	26,0	87,9	31,4	65,6	
08-août-00	61		66		73		16,9	3,1	12,3	6,6	17,8	2,3	5,8	15,5	17,5	2,7	2,4	8,4	25,8	86,3	34,0	53,7	
09-août-00	56		63		66		16,8	3,1	12,1	6,7	17,6	2,3	5,8	15,5	17,3	2,7		8,4	24,2	98,7	34,4	35,2	
10-août-00	57		62		66		16,8	3,1	12,1	6,7	17,6	2,3	5,6	15,5	17,5	2,7	3,2	11,6	26,3	85,3	30,4	64,2	
11-août-00	53		59		61		16,8	3,1	11,7	7,0	17,6	2,3	5,8	15,5	17,3	2,7	0,2	11,8	21,8	91,1	35,0	48,7	
12-août-00	54		60		62		16,7	3,1	12,2	6,7	17,6	2,5	6,0	15,3	17,4	2,7	0,2	12,0	23,7	90,3	37,9	40,7	
13-août-00	56		61		65		16,7	3,1	12,7	6,4	17,7	2,3	6,0	15,4	17,6	2,6	1,6	13,6	25,6	91,3	40,4	52,4	
14-août-00	57		62		67		16,7	3,1	12,5	6,5	17,7	2,3	6,0	15,5	17,6	2,3	0,4	14,0	32,9	68,0	35,7	57,6	
15-août-00	53		58		62		16,9	3,1	11,8	7,0	17,8	2,3	5,9	15,5	17,4	2,7	0,9	14,9	28,0	90,1	32,0	55,0	
16-août-00	49		54		55		16,8	3,1	11,5	7,1	17,7	2,3	5,9	15,3	17,5	2,6	7,8	22,7	23,9	73,5	30,6	68,1	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
17-août-00	46		52		53		16,8	3,1	11,2	7,1	17,6	2,3	5,8	15,1	17,4	2,7	1,0	23,7	24,5	98,3	31,5	56,8	
18-août-00	47		49		51		16,7	3,1	12,1	6,6	17,6	2,3	5,8	15,1	17,4	2,7	4,6	28,3	21,1	90,8	33,7	44,1	
19-août-00	47		49		52		16,8	3,1	12,0	6,6	17,5	2,2	5,4	14,9	17,3	2,7	4,8	33,1	24,8	97,0	31,8	62,1	
20-août-00	43		47		50		16,8	3,1	11,9	6,6	17,4	2,3	5,7	15,1	17,1	2,7	7,1	40,2	24,7	96,6	30,4	57,8	
21-août-00																	2,2	42,4	14,6	69,7	12,1	27,2	Coupure courant + Maintenance
22-août-00	43		44		48		16,9	3,1	11,9	6,7	17,6	2,3	6,1	14,8	17,3	2,7	0,8	43,2	11,9	69,2	30,4	45,8	
23-août-00	41		45		47		17,2	3,1	12,9	5,9	17,8	2,3	6,4	14,4	17,5	2,5	9,4	52,6	19,8	93,3	32,4	49,7	
24-août-00	42		45		47		17,2	3,1	12,5	6,3	17,9	2,3	6,5	14,3	17,5	2,7	0,6	53,2	23,0	82,3	35,9	52,2	Maintenance calibration
25-août-00	56		64		64		17,2	3,1	13,0	5,7	17,9	2,3	6,5	14,2	17,5	2,7	1,0	54,2	23,2	91,7	35,4	42,2	
26-août-00	55		62		63		16,9	3,1	11,9	6,3	17,5	2,3	6,3	14,1	17,3	2,5	4,7	58,9	25,7	83,5	35,9	51,6	
27-août-00			63		63		17,0	3,1	11,2	6,7	17,8	2,3	6,4	14,0	17,4	2,5	7,8	66,7	25,6	89,6	27,6	77,5	
28-août-00	54		55		60		17,3	3,1	10,9	6,9	17,9	2,3	6,4	14,0	17,5	2,7	4,8	71,5	20,5	88,5	27,7	61,2	
29-août-00	52		57		58		17,3	3,1	10,7	7,1	17,9	2,3	6,6	14,0	17,4	2,7	0,6	72,1	23,2	75,9	32,2	42,9	
30-août-00					58		17,3	3,1	12,3	5,9	17,9	2,3	6,6	13,8	17,3	2,7	0,4	72,5	22,3	87,8	30,8	46,6	
31-août-00	50		52		56						17,8	2,7	6,8	14,7	17,7	3,1	2,0	74,5	21,1	83,2	31,6	40,4	Maintenance
01-sept-00	61		61		60		17,5	3,9							17,7	3,1	21,4	95,9	19,2	93,9	28,7	50,0	Maintenance
02-sept-00	49		50		56		17,9	3,9	10,1	8,3	17,9	2,7	5,3	14,6	17,3	3,1	9,8	105,7	20,8	93,4	26,2	74,3	
03-sept-00	50		49		56		17,5	3,9	10,7	8,3	18,3	2,7	6,2	14,3	17,6	3,1	1,6	107,3	21,3	94,1	23,6	68,4	
04-sept-00	44		48		55		17,7	3,9	11,1	8,1	18,5	2,4	5,0	14,2	17,8	3,1	10,3	117,6	20,0	85,5	27,2	57,9	
05-sept-00			52		55		17,7	3,9	10,7	8,6	17,5	2,9	4,9	15,5	18,1	2,7	1,4	119,0	17,8	95,0	27,6	53,5	mesure à 10'
06-sept-00			48		54		17,5	3,9	10,2	8,6	17,0	3,0	5,1	15,2	17,1	3,1	5,0	124,0	21,6	75,6	24,5	88,2	
07-sept-00			46		53		17,6	3,9			17,4	3,1	5,2	15,4	17,1	3,1	10,4	134,4	20,9	94,1	26,5	57,9	Maintenance
08-sept-00	46		50		53		17,6	3,9	9,8	9,0	17,3	3,1	5,3	15,2	17,6	2,7	0,2	134,6	23,0	81,0	27,7	83,1	
09-sept-00			48		53		17,6	3,9	10,3	8,7	17,3	3,1	5,3	15,4	17,8	2,7	11,1	145,7	26,1	84,6	32,2	63,1	
10-sept-00	49		50		52		17,6	3,9	10,6	8,6	17,3	3,1	5,1	15,3	17,3	3,1	3,6	149,3	22,7	96,3	35,2	55,8	
11-sept-00	49		51		51		17,5	3,9	11,2	8,2	17,7	2,7	4,9	15,0	17,3	2,7	1,4	150,7	23,1	95,1	37,5	52,1	Maintenance
12-sept-00	62		58		60		17,2	3,9	11,0	7,9	17,0	3,1	4,8	14,8	16,8	3,1	6,5	157,2	27,1	87,1	28,2	78,2	
13-sept-00			52		55		17,4	3,9	10,3	8,2	17,2	3,1	4,9	14,8	17,3	2,7	1,6	158,8	21,5	90,9	30,9	57,3	
14-sept-00			54		55		17,4	3,9	10,2	8,3	17,2	3,1	4,8	15,0	16,9	3,1	2,0	160,8	22,0	92,6	30,2	56,6	
15-sept-00			52		54		17,2	3,9	10,2	8,3	17,1	3,1	4,7	14,9	16,9	3,1	6,6	167,4	20,0	94,8	32,8	59,0	
16-sept-00			47		53		17,2	3,9	9,2	8,7	17,0	3,1	4,7	14,7	16,9	3,1		167,4	22,7	90,3			
17-sept-00			46		53		17,3	3,9	9,1	8,7	17,1	3,1	4,4	14,8	17,0	3,1		167,4					
18-sept-00			46		54		17,1	3,9	9,1	8,3	17,0	3,1	4,8	14,5	16,9	3,1		167,4					
19-sept-00			48		55		16,6	3,9	13,1	6,5	16,8	3,1	5,1	14,5	17,3	2,7		167,4					
20-sept-00			48		56		16,6	3,9	12,9	6,7	17,2	2,9	5,6	14,1	16,9	2,9	0,4	167,8	23,5	86,8	27,5	56,2	
21-sept-00			44		57		17,1	3,9	11,3	7,5	17,5	3,0	5,7	14,2	17,3	3,1	1,0	168,8	17,1	95,8	28,5	50,4	
22-sept-00			47		58		17,0	3,9	11,5	7,5	17,6	3,0	5,8	14,1	17,3	2,9	2,2	171,0	23,1	85,4	29,8	72,9	
23-sept-00			49		60		17,1	3,9	11,7	7,3	17,6	3,1	5,5	14,4	17,4	3,0	2,7	173,7	25,8	86,8	32,2	54,0	
24-sept-00			44		60		17,0	3,9	12,1	7,0	17,4	3,1	5,2	14,3	17,0	3,1	5,4	179,1	21,8	80,3	31,9	60,8	
25-sept-00			44		61		17,3	3,9	11,0	7,5	17,7	3,0	5,5	14,2	17,3	3,1	0,2	179,3	21,0	91,8	29,0	48,9	
26-sept-00			45		62		17,1	3,9	11,0	7,5					17,0	3,1	11,0	190,3	22,0	87,4	33,3	66,3	Maintenance
27-sept-00	48		52		67		17,1	3,9	10,1	7,9	17,5	3,0	5,5	14,1	17,4	2,7	0,5	190,8	24,3	97,4	28,4	65,8	
28-sept-00	47		46		67		16,4	3,9	9,3	7,9	17,2	2,9	5,7	13,8	16,0	3,1	9,4	200,2	24,0	81,0	23,5	93,1	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
29-sept-00			45		67		16,0	3,9	10,5	7,5	17,2	3,0	5,6	13,7	16,3	3,1	10,0	210,2	22,6	94,5	24,9	90,2	
30-sept-00			44		67		16,2	3,9	10,6	7,5	17,3	2,8	5,2	13,7	16,4	3,1	7,9	218,1	21,6	102,3	23,8	87,4	
01-oct-00	45		43		68		16,4	3,9	10,0	7,9	17,3	3,1	5,1	13,7	16,6	3,1	0,2	218,3	16,4	103,1	26,5	73,5	
02-oct-00	44		42		67		16,3	3,8	10,0	7,5	17,3	2,8	5,6	13,3	16,6	3,0	7,2	225,5	19,9	94,1	22,8	87,1	
03-oct-00	44		42		67		16,8	3,9	10,0	7,9	17,8	2,7	6,0	13,3	17,1	2,8	1,6	227,1	19,1	97,7	24,1	75,4	
04-oct-00	43		41		66		16,6	3,9	10,1	7,9	17,7	2,7	6,2	13,0	17,0	2,8	1,4	228,5	17,8	91,8	23,3	85,1	
05-oct-00	43		41		67		16,6	3,9	10,3	7,9	17,6	2,8	6,2	13,0	17,1	2,7	1,0	229,5	19,9	100,2	21,7	82,2	
06-oct-00			41		68		16,7	3,9	10,0	8,2	17,9	2,8	6,5	13,0	17,0	3,1	2,1	231,6	14,6	95,4	18,4	91,0	
07-oct-00			44		69		16,5	3,9	10,0	8,3	17,8	2,9	6,3	13,0	17,3	3,0	1,4	233,0	12,4	101,8	17,4	88,4	
08-oct-00			40		67		16,2	3,9	10,6	7,5	17,7	2,7	6,8	12,4	16,6	2,8	7,2	240,2	14,7	102,1	19,4	100,8	
09-oct-00			41		68		16,3	3,9	10,0	7,9	17,6	2,7	6,4	12,4	16,8	2,7	12,9	253,1	16,3	98,9	20,0	82,1	
10-oct-00			39		67		15,2	3,9	9,9	7,5	17,1	2,7	6,3	11,8	15,8	2,7	16,5	269,6	15,4	98,2	13,5	97,1	Maintenance passage à 2h
11-oct-00	41		39		66		14,4	4,3	8,9	10,0	17,6	2,9	8,1	11,6	16,3	3,1	13,9	283,5	15,4	94,1	21,0	69,9	
12-oct-00	41		39		67		13,6	4,7	10,8	8,0	18,0	2,7	9,8	10,8	16,6	3,1		283,5	15,9	89,3	19,3	89,3	
13-oct-00	42		40		67		14,1	4,7	11,6	7,9	18,5	2,8	10,3	10,7	17,5	2,7	0,6	284,1	17,8	92,6	21,2	83,8	
14-oct-00	41		37		65		15,1	4,7	11,9	7,9	18,6	2,9	9,8	10,7	17,6	2,7	13,1	297,2	13,0	102,4	15,7	106,2	
15-oct-00	41		39		65		15,2	4,3	12,3	7,5	18,2	3,0	9,0	10,8	17,3	2,7		297,2	14,6	106,1	17,6	100,0	
16-oct-00	42		38		67		15,5	4,1	12,0	7,3	17,8	3,1	9,3	10,5	16,3	3,2	32,4	329,6	17,0	102,3	16,7	101,1	
17-oct-00	39		37		61		16,0	4,4	12,0	6,9	18,5	2,8	9,6	10,6	16,8	3,0	4,8	334,4	17,5	101,6	21,4	74,4	
18-oct-00	40		36		54		15,7	4,4	12,8	6,1	18,3	2,7	10,7	9,5	16,0	3,2	7,8	342,2	16,2	93,4	17,7	99,5	
19-oct-00	37		37		7		15,1	4,5	11,8	6,1	18,3	2,7	9,9	10,4	15,6	3,3	29,7	371,9	18,7	102,7	23,9	68,9	
20-oct-00	35		35		15		15,1	4,5	13,4	5,5	18,2	2,7	10,1	9,8	16,0	2,9	3,8	375,7	11,8	103,6	22,0	108,9	
21-oct-00	35		34		16		14,8	4,8	13,6	5,7	18,4	2,7	10,7	9,8	16,7	2,9	0,4	376,1	21,4	95,1	24,8	87,0	
22-oct-00	33		32		12		14,9	4,8	13,0	6,1	18,3	2,7	10,8	9,6	16,9	2,9		376,1	19,0	101,7	27,0	81,4	
23-oct-00	32		29		12		14,6	4,8	12,8	6,1	17,9	3,0	10,8	9,5	16,5	2,9	0,4	376,5	19,4	98,3	25,3	86,2	
24-oct-00	30		27		12		14,7	4,7	11,2	7,1	18,0	3,0	10,9	9,5	17,2	2,9	6,4	382,9	20,7	86,5	19,9	87,5	
25-oct-00	28		26				14,2	4,8	10,2	7,6	17,5	3,1	10,6	9,8	17,3	2,9	2,6	385,5	18,2	90,5	21,5	91,0	
26-oct-00	27		24				14,4	4,8	10,4	7,6	21,5	1,1	21,0	1,5	20,7	1,5	6,2	391,7	17,9	97,7	21,9	69,4	
27-oct-00	26		25		6		14,5	4,7	10,6	7,5	17,4	3,2	9,7	10,1	17,4	2,9	3,0	394,7	16,4	95,9	20,5	86,9	
28-oct-00	26		25		6		13,7	4,9	9,9	8,0	17,3	3,2	9,6	10,3	17,5	2,9	5,4	400,1	19,8	93,6	21,9	86,8	
29-oct-00	25		25				12,7	4,9	9,5	8,0	17,1	3,2	9,2	10,9	18,1	2,6	1,6	401,7	20,2	90,9	19,5	75,2	
30-oct-00	24		24		3		10,7	5,2	7,7	8,7	16,0	3,3	9,7	10,2	19,0	2,2	14,7	416,4	19,6	80,9	14,5	95,7	
31-oct-00	22		21				10,6	5,2	8,3	8,5	16,4	3,2	11,4	9,8	19,1	2,5	5,9	422,3	14,0	92,2	19,3	84,6	
01-nov-00	22		21				11,1	5,3	9,5	8,5	16,7	3,2	11,2	9,4	18,1	2,5	13,6	435,9	15,2	92,9	14,4	93,7	
02-nov-00	21		20				11,3	5,5	10,3	5,9	17,1	2,7	10,0	9,4	17,7	2,5	3,6	439,5	13,3	90,4	16,1	98,6	
03-nov-00	20		20				11,3	5,5	13,2	5,8	17,3	2,7	11,0	8,7	17,8	2,5	4,1	443,6	14,8	88,7	18,5	77,6	
04-nov-00	20		19				11,6	5,6	12,4	6,5	18,0	2,7	11,0	8,7	18,3	2,3	2,4	446,0	12,6	97,4	15,8	89,8	
05-nov-00	19		18				12,0	5,5	12,6	6,3	17,9	2,7	10,8	8,7	18,1	2,3	0,6	446,6	13,6	94,2	15,4	85,6	
06-nov-00	20		19				10,3	5,9	18,8	2,7	16,6	2,7	9,7	8,8	17,6	2,3	10,8	457,4	16,2	82,7	19,8	81,5	
07-nov-00	19		18				10,2	5,9	16,7	3,5	16,9	2,7	10,4	8,5	17,4	2,3	14,5	471,9	14,8	89,2	15,6	95,0	
08-nov-00	18		16				10,8	5,9	12,7	5,9	17,4	2,4	10,9	8,3	18,1	2,3	4,6	476,5	14,6	98,7	15,1	95,0	
09-nov-00	16		16				11,9	5,9	12,3	6,3	18,0	2,3	10,9	8,2	18,7	2,3	3,4	479,9	14,0	97,5	15,8	87,8	
10-nov-00	21		21				12,8	5,5	12,5	6,3	18,5	2,3	11,0	8,0	19,0	2,3	0,8	480,7	13,5	89,2	14,9	86,4	
11-nov-00	20		21				13,1	5,5	12,9	5,8	18,2	2,4	11,6	7,9	19,1	2,1	1,0	481,7	13,5	88,9	17,7	83,4	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
12-nov-00	20		21				11,3	5,6	13,2	5,4	17,9	2,4	12,2	7,6	19,3	2,1	13,7	495,4	14,6	83,9	16,0	97,2	
13-nov-00	20		20				11,0	5,6	11,8	5,8	17,7	2,4	12,5	7,5	18,8	2,1	6,0	501,4	14,7	100,2	17,5	86,8	
14-nov-00	19		20				11,9	5,6	12,5	5,1	17,9	2,3	11,6	7,5	18,6	2,4	5,1	506,5	13,7	99,5	14,5	91,8	
15-nov-00	17		18				12,0	5,6	13,4	4,9	18,3	2,3	11,8	7,5	18,8	2,1	2,6	509,1	10,6	99,5	14,4	90,5	
16-nov-00	15		17				11,6	5,6	12,9	5,0	18,2	2,3	12,6	7,2	18,9	2,1	5,8	514,9	12,0	96,3	14,5	97,2	
17-nov-00	15		17				12,2	5,6	12,9	5,0	18,3	2,3	12,6	7,2	18,6	2,4	4,4	519,3	11,6	98,8	13,5	88,1	
18-nov-00	14		16				13,0	5,3	12,2	5,4	18,1	2,4	12,0	7,2	18,9	2,1	3,3	522,6	10,3	97,2	14,8	93,4	
19-nov-00	14		17				11,5	5,9	11,9	5,4	17,6	2,4	11,8	7,2	19,4	2,1	3,2	525,8	13,8	98,6	17,3	85,8	
20-nov-00	15		17				12,2	5,6	11,1	5,8	17,8	2,4	12,1	7,1	19,1	2,1	11,5	537,3	13,7	94,6			
21-nov-00	10										18,3	2,4	12,2	7,2	19,5	2,1	12,0	549,3			13,2	90,4	
22-nov-00	17		20				10,6	6,1	14,5	4,3	18,5	2,3	12,8	7,0	19,9	2,0	3,2	552,5	16,3	91,0	17,4	82,9	
23-nov-00	19		20				10,9	6,1	13,0	4,7	18,1	2,3	12,5	7,0	19,4	2,1	4,2	556,7	12,9	96,9	18,7	93,7	
24-nov-00	17		20														6,9	563,6	13,8	95,0			
25-nov-00	17		19				11,8	6,0	14,0	4,4	18,5	2,3	12,3	6,8	19,6	2,0	8,4	572,0	12,6	95,8	16,0	89,9	
26-nov-00	16		19				11,2	6,0	14,0	4,2	18,4	2,3	12,4	7,1	19,8	2,0	3,6	575,6	13,9	94,1	15,6	85,6	
27-nov-00	16		19				12,5	6,1	12,3	5,0	18,9	2,3	12,9	7,0	19,9	2,0	2,6	578,2	12,8	91,7	13,2	96,0	
28-nov-00	16		19				12,3	6,1	14,1	4,7	18,8	2,3	12,5	7,1	20,0	1,7	2,0	580,2	14,9	99,2	20,7	92,8	
29-nov-00	16		19				12,4	6,0	15,1	4,0	18,8	2,3	12,2	7,2	20,0	2,1	0,6	580,8	19,2	92,3	20,7	84,0	
30-nov-00	16		19				13,0	6,0	14,4	4,3	19,0	2,3	12,5	7,2	19,9	2,0	1,5	582,3	18,9	93,5	17,3	94,2	
01-déc-00	16		19				12,8	6,1	16,6	3,3	19,0	2,3	12,1	7,2	19,9	2,1	5,4	587,7	18,8	92,5	17,8	98,2	
02-déc-00	16		18				12,5	6,4	15,3	3,9	19,2	2,3	12,6	7,2	20,0	2,1	1,2	588,9	18,9	95,8	17,7	98,4	
03-déc-00	16		18				13,6	6,1	13,7	4,6	19,1	2,3	12,2	7,3	19,8	2,1	7,4	596,3	15,9	103,9	15,3	90,8	
04-déc-00	15		18				13,4	6,0	15,2	4,0	19,1	2,3	11,5	7,4	19,6	2,1	6,1	602,4	11,6	95,0	14,7	92,4	
05-déc-00	15		18				12,9	6,3			19,3	2,3	12,1	7,3	19,7	2,1	6,2	608,6	14,5	93,1	18,1	83,9	
06-déc-00	15		18				12,6	6,3	16,7	3,2	19,3	2,3	12,4	7,2	19,9	2,1	4,4	613,0	18,8	88,2	17,2	99,4	
07-déc-00	15		18				12,9	6,3	14,8	3,9	19,0	2,3	12,2	7,2	19,5	2,1	5,4	618,4	17,2	93,2	19,0	91,4	
08-déc-00	15		18				12,9	6,0	15,5	3,6	19,1	2,3	14,6	7,6	19,9	1,7	1,2	619,6	21,4	86,2	19,2	82,2	
09-déc-00	15		18				12,8	6,3	13,5	4,3	19,4	2,3	12,9	7,1	20,1	2,0	2,0	621,6	16,0	91,2	17,6	84,9	
10-déc-00	15		18				12,2	6,4	13,4	4,7	19,3	2,3	13,1	6,9	20,1	2,0	6,3	627,9	14,1	95,3	17,6	82,1	
11-déc-00	15		18				12,7	6,4	11,9	5,7	19,6	2,4	13,4	7,0	20,5	1,7	2,2	630,1	17,5	93,7	19,9	88,7	
12-déc-00	15		17				12,6	6,4	11,9	5,8	19,5	2,3	13,0	7,2	20,0	1,9	7,6	637,7	20,9	94,7	19,4	93,6	
13-déc-00	15		17				12,6	6,4	11,7	5,8	19,5	2,4	12,5	7,2	20,3	2,0		637,7	18,1	87,9	18,1	85,5	
14-déc-00	14		18				12,9	6,4	11,2	5,5	19,3	2,3	13,1	5,8	20,2	2,0	12,4	650,1	15,7	88,9	13,1	99,8	
15-déc-00	14		28				13,4	6,3	11,8	5,1	19,3	2,0	12,5	5,7	20,1	2,0	0,6	650,7	11,6	96,8	12,7	85,4	
16-déc-00	14		24				14,2	6,0	12,8	5,0	19,6	2,0	12,9	5,7	20,3	2,0	10,9	661,6	7,1	97,8	10,5	80,1	
17-déc-00	15		23				14,6	6,1	13,8	4,7	19,9	2,0	13,2	5,7	20,3	2,0	2,4	664,0	8,2	101,8	10,5	90,5	
18-déc-00	14		22				14,9	6,0	14,9	4,3	20,0	1,9	10,9	7,8	20,3	2,0	15,5	679,5	6,7	100,5	12,8	102,0	
19-déc-00	14		22				15,4	6,0	15,1	4,3	20,2	1,9	12,2	7,5	20,5	2,1		679,5	14,2	102,6	15,3	99,9	
20-déc-00	20		28				16,0	5,6	15,7	3,9	20,1	1,9	12,2	7,2	20,2	2,0	1,9	681,4	14,3	99,7	12,9	84,7	
21-déc-00	21		27				16,2	5,6	15,3	4,2	20,1	1,9	12,4	6,9	20,3	2,1	4,0	685,4	5,2	96,7	4,8	95,0	
22-déc-00	20		27				16,2	5,3	15,1	4,2	20,0	1,9	12,5	6,8	20,2	2,0	8,6	694,0	1,6	101,6	13,0	76,5	
23-déc-00	21		27				16,0	5,3	14,6	4,2	19,8	1,9	12,4	6,8	20,0	2,0	0,7	694,7	5,1	99,0	10,2	90,1	
24-déc-00	21		27				16,2	5,1	14,6	4,2	19,7	1,9	12,8	6,4	20,0	1,7	9,0	703,7	7,8	98,6	6,1	96,0	
25-déc-00	20		25				16,3	4,8	14,7	4,2	19,7	1,9	12,8	6,4	19,7	1,7	1,4	705,1	5,1	95,4	4,7	97,1	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
26-déc-00	21		25				16,3	4,8	14,8	4,2	19,6	1,9	13,0	6,1	19,8	1,7	2,0	707,1	5,0	100,8	5,4	103,5	
27-déc-00	22		25				16,6	4,8	15,0	4,2	19,7	1,9	13,3	6,0	20,0	1,6	5,4	712,5	5,7	103,6	9,6	90,0	
28-déc-00	21		22				16,7	4,9	14,8	4,6	19,7	1,9	13,3	6,1	20,0	1,6	1,2	713,7	6,9	98,3	6,5	103,1	
29-déc-00	22		22				17,0	4,9	14,9	4,6	19,8	1,9	13,6	6,1	20,2	1,6	4,1	717,8	4,4	102,0	7,6	93,9	
30-déc-00	22		23				17,4	4,8	15,2	4,6	20,1	1,9	13,9	6,1	20,4	1,6	6,1	723,9	6,2	98,9	6,4	94,0	
31-déc-00	20		21				16,4	4,9	17,5	3,1	19,7	1,9	13,6	5,7	20,1	1,6	19,1	743,0	8,0	85,0	12,8	99,2	
01-janv-01	22		19				15,5	5,2	16,3	2,8	19,7	1,9	14,0	5,7	20,4	1,3	2,8	2,8	14,2	96,7	17,3	85,9	
02-janv-01	22		20,0				15,5	5,2	14,1	3,5	20,0	1,9	15,4	5,4	20,8	1,2	10,7	13,5	15,6	88,8	14,0	86,2	
03-janv-01	22		21				14,9	5,2	16,5	2,8	19,9	1,9	15,2	5,3	20,5	1,2	6,6	20,1	13,8	93,4	15,1	91,7	
04-janv-01	21		21				14,6	5,2	14,5	3,1	19,9	1,8	16,0	4,2	20,3	1,5	23,7	43,8	12,8	94,1	15,8	95,1	
05-janv-01	20		38				15,3	5,2	12,8	3,2	20,0	1,5	15,7	4,2	20,6	1,6	6,0	49,8	12,7	103,7	14,2	89,7	
06-janv-01	19		28				15,9	5,2	14,1	3,2	20,4	1,5	16,0	4,1	20,8	1,6	6,9	56,7	10,7	96,4	12,9	92,4	
07-janv-01	19		25				16,6	4,8	14,9	3,5	20,6	1,5	15,7	4,1	20,7	1,6	3,6	60,3	8,9	100,3	11,4	95,4	
08-janv-01	18		24				16,9	4,9	15,4	3,5	20,6	1,5	13,7	6,0	20,8	1,6	0,8	61,1	10,6	98,9	11,0	94,5	
09-janv-01			24				17,1	4,8	16,2	3,1	20,5	1,5	14,0	5,6	20,5	1,6	11,7	72,8	8,3	95,0	9,6	103,7	
10-janv-01			23				17,4	4,8	15,9	3,1	20,7	1,5	14,0	5,6	20,7	1,6	7,8	80,6	9,8	104,2	9,9	97,9	
11-janv-01			22				17,7	4,8	16,9	3,1	20,9	1,5	15,6	4,2	21,1	1,6	0,8	81,4	9,2	95,3	11,0	78,4	
12-janv-01			22				18,0	4,5	17,4	3,1	21,1	1,5	14,1	5,6	21,2	1,6	1,2	82,6	5,6	94,7	9,3	71,5	
13-janv-01			22				18,1	4,5	17,5	3,1	21,1	1,5	14,9	5,3	21,2	1,6	0,2	82,8	5,9	78,5	9,0	83,7	
14-janv-01			21				18,1	4,5	17,4	3,1	21,0	1,5	14,8	5,2	21,1	1,6	8,3	91,1	3,7	98,6			
15-janv-01																	4,2	95,3					
16-janv-01	16		21				17,8	4,4	17,0	3,1	20,4	1,5	14,4	5,1	20,6	1,6	0,8	96,1	-0,4	98,9	8,7	76,8	
17-janv-01	16		20				17,8	4,2	16,7	3,1	20,3	1,5	14,3	4,9	20,4	1,6	5,2	101,3	1,2	98,7	8,4	79,1	
18-janv-01	16		19				17,8	4,1	16,6	3,1	20,2	1,5	14,3	4,9	20,3	1,6	3,6	104,9	1,8	99,2	7,2	83,6	
19-janv-01	15		18				17,9	4,2	16,6	3,1	20,3	1,5	14,4	5,1	20,4	1,6	0,8	105,7	4,1	98,2	7,7	94,9	
20-janv-01	15		20				18,0	4,1	16,6	3,1	20,3	1,5	14,5	4,9	20,4	1,6	5,7	111,4	1,5	102,0	6,1	98,2	
21-janv-01	14		16				17,9	4,4	16,5	3,1	20,2	1,5	14,4	4,9	20,2	1,6	23,1	134,5	5,5	99,8	7,3	99,0	
22-janv-01	13		16				17,4	4,4	15,9	3,1	19,8	1,5	13,9	4,9	20,1	1,2	15,9	150,4	11,9	102,7	15,8	85,6	
23-janv-01	14		15				17,0	4,4	16,6	2,4	19,7	1,5	15,0	3,8	20,2	1,2	5,4	155,8	14,1	97,6	14,7	99,1	
24-janv-01	15		17				16,4	4,5	16,7	2,4	19,8	1,5	15,7	3,8	20,3	1,0	5,2	161,0	18,5	92,3	15,5	88,1	
25-janv-01	14		17				16,5	4,4	16,7	2,4	20,0	1,5	16,1	3,8	20,3	1,2	9,8	170,8	13,0	87,2	15,6	87,4	
26-janv-01	13		17				16,6	4,4	16,8	2,4	20,0	1,5	16,2	3,7	20,3	1,2	3,3	174,1	11,2	93,7	13,3	89,8	
27-janv-01	13		16				16,6	4,3	16,7	2,7	20,0	1,5	15,9	3,7	20,1	1,2	7,0	181,1	12,2	90,1	13,8	79,5	
28-janv-01	14		18				16,9	4,1	16,4	2,7	20,1	1,5	15,5	3,8	20,2	1,2	0,2	181,3	7,6	98,5	13,2	80,6	
29-janv-01	14		15				17,5	4,1	17,4	2,7	20,3	1,5	14,2	5,4	20,4	1,3	5,8	187,1	5,6	102,4	12,2	93,1	
30-janv-01	13		15				17,8	4,1	17,4	2,7	20,4	1,5	14,8	5,0	20,4	1,2	1,3	188,4	9,6	102,3	10,6	85,1	
31-janv-01	13		13				17,9	4,1	17,8	2,7	20,4	1,5	14,8	4,9	20,4	1,3	0,6	189,0	8,4	93,9	11,2	82,5	
01-févr-01	14		14				18,2	4,1	17,8	2,7	20,6	1,5	14,9	4,9	20,5	1,6	0,0	189,0	5,8	100,4	8,0	89,6	
02-févr-01	13		13				18,1	4,0	17,4	2,7	20,3	1,5	14,4	4,9	20,2	1,4	6,8	195,8	4,2	101,3	6,1	103,2	
03-févr-01	12		12				17,6	4,0	16,8	2,7	19,9	1,5	14,1	4,9	20,0	1,2	7,0	202,8	8,8	104,4	14,4	99,8	
04-févr-01	11		12				17,5	4,0	16,3	2,7	19,8	1,5	13,7	4,9	20,0	1,2	8,9	211,7	11,9	97,6	18,2	88,7	
05-févr-01	11		12				17,2	4,0	16,0	2,7	19,7	1,5	15,1	3,8	20,2	0,9	6,8	218,5	15,9	93,7	16,2	96,0	
06-févr-01	11		12				16,9	4,4	16,2	2,7	19,9	1,5	15,5	3,8	20,3	1,2	18,3	236,8	17,3	97,5	20,0	86,0	
07-févr-01	10		12				16,5	4,4	16,9	2,7	20,1	1,5	15,7	3,8	20,3	0,9	6,4	243,2	16,9	91,9	18,0	93,2	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
08-févr-01	9		12				16,2	4,4	17,2	2,4	19,9	1,5	15,7	3,9	17,0	3,1	1,0	244,2	15,4	101,8	16,9	82,0	
09-févr-01	9		11						16,9	2,7	20,5	1,5	15,9	3,8	20,5	1,2	16,5	260,7	10,7	94,6	13,6	71,0	
10-févr-01	8		12		7		17,6	4,1	17,8	2,7	20,7	1,5	14,5	5,5	20,8	1,2	0,7	261,4	3,5	100,9	11,3	91,5	
11-févr-01	7		9		7		17,4	4,4	18,1	2,4	20,6	1,5	15,0	5,2	20,9	1,2	4,5	265,9	12,3	89,9	18,7	94,5	
12-févr-01	7		10		6		16,8	4,4	17,4	2,4	20,5	1,5	15,1	4,9	20,7	1,2	15,1	281,0	16,8	97,6	19,7	88,3	
13-févr-01	7		8		11		17,8	4,1	17,8	2,7	21,1	1,5	15,6	4,9	21,0	1,2	2,0	283,0	14,8	101,7	15,0	82,6	
14-févr-01	7		10		11		18,2	4,1	18,2	2,7	21,0	1,5	14,9	4,9	20,9	1,4	1,4	284,4	9,5	97,3	13,8	83,7	
15-févr-01	7		9		10		18,4	4,1	18,2	2,7	20,9	1,5	14,4	4,9	20,9	1,5	0,4	284,8	6,2	100,5	21,2	54,5	
16-févr-01	7		7		10		18,5	4,1	18,2	2,7	20,8	1,5	14,2	4,9	20,8	1,6	0,6	285,4	6,9	99,9	10,5	99,7	
17-févr-01	7		6		9		18,8	4,0	18,1	2,7	20,9	1,5	14,4	5,0	21,0	1,4	1,2	286,6	10,8	100,7	11,4	88,5	
18-févr-01	7		7		9		19,0	4,0	18,2	2,7	21,0	1,5	14,5	4,9	21,0	1,4	3,1	289,7	9,7	86,7	10,8	89,4	
19-févr-01	6		6		8		18,9	4,0	18,1	2,7	20,8	1,5	14,3	5,3	20,9	1,6	1,0	290,7	8,6	100,0	14,6	78,0	
20-févr-01	6		6		8												0,8	291,5	10,5	100,5	15,2	76,6	
21-févr-01	10		11		15		18,3	3,9	16,4	3,0	19,8	1,8	13,0	5,6	20,1	1,6		291,5	9,0	96,8	14,8	93,2	
22-févr-01	11		11		15		18,1	4,0	16,4	3,1	19,6	1,9	13,1	5,6	19,9	1,6	10,5	302,0	13,8	100,6	15,2	81,3	
23-févr-01	10		11		15		17,8	3,7	15,9	3,1	19,4	1,8	13,0	5,4	19,6	1,6	6,6	308,6	12,5	98,4	12,1	71,7	
24-févr-01	10		10		14		17,8	3,8	16,1	3,1	19,5	1,8	13,4	5,3	19,8	1,6	3,6	312,2	5,6	102,2	4,7	102,2	
25-févr-01	11		11		14		18,0	3,7	16,6	3,1	19,6	1,6	13,5	5,3	20,0	1,4	3,0	315,2	0,2	98,3	9,8	77,7	
26-févr-01	10		10		13		17,9	3,7	16,2	3,1	19,4	1,8	13,4	5,3	19,9	1,2		315,2	6,7	90,9	11,9	76,6	
27-févr-01	9		9		13		17,2	4,0	17,5	2,4	19,2	1,8	13,4	5,3	19,5	1,3	2,0	317,2	7,3	89,0	9,6	86,5	
28-févr-01	9		9		12		17,0	4,1	17,2	2,3	19,2	1,9	13,9	5,1	19,6	1,2	7,7	324,9	10,6	84,6	13,7	76,2	
01-mars-01	9		8		12		17,3	3,7	16,5	2,7	19,2	1,9	13,9	4,9	19,5	1,3	3,0	327,9	6,6	103,0	9,3	100,3	
02-mars-01	9		7		11		17,5	3,7	16,0	3,0	19,2	1,9	13,9	4,9	19,5	1,3	1,4	329,3	6,9	102,9	10,9	74,3	
03-mars-01	9		8		11		17,6	3,7	16,2	2,7	19,1	1,9	13,7	4,9	19,5	1,4		329,3	6,0	96,4	7,5	86,0	
04-mars-01	9		7		11		17,5	3,6	16,4	2,7	19,1	1,9	13,7	4,9	19,5	1,3	0,8	330,1	6,0	90,0	9,2	95,1	
05-mars-01	8		6		10		18,0	3,6	17,1	2,7	19,6	1,9	14,4	5,0	20,0	1,3	0,6	330,7	7,8	98,7	11,1	80,4	
06-mars-01	8		6		10		17,9	3,7	17,3	2,7	19,5	1,9	14,2	5,1	20,0	1,6	0,6	331,3	5,8	94,1	20,2	62,1	
07-mars-01	8		5		9						19,6	1,9	14,3	5,6	20,6	1,3	5,2	336,5	15,8	81,2	23,6	79,2	
08-mars-01	38		35		45		17,9	4,1	16,5	3,1	19,4	1,9	13,9	5,3	20,2	1,2	10,9	347,4	16,6	98,1	17,9	95,8	
09-mars-01	29		26		36		17,8	4,0	15,9	3,1	19,4	1,9	14,0	5,6	20,3	1,2	8,6	356,0	16,0	93,5	17,9	91,0	
10-mars-01	29		25		34		17,7	4,1	15,8	2,8	19,4	1,9	14,1	5,4	20,4	1,2	10,3	366,3	16,0	96,2	18,9	97,7	
11-mars-01	29		28		36		17,8	4,1	15,2	3,1	19,5	1,9	14,0	5,6	20,5	1,2	5,2	371,5	17,7	95,8	20,8	95,7	
12-mars-01	30		28		37		17,7	4,1	15,3	3,1	19,4	1,9	14,0	5,6	20,4	1,2	5,2	376,7	17,5	99,2	19,1	68,5	
13-mars-01	24		20		27		17,5	4,0	15,2	3,1	19,2	1,9	14,1	5,3	20,3	1,2	9,9	386,6	13,0	90,9	14,4	95,0	
14-mars-01	25		23		31		17,6	4,1	15,2	3,1	19,5	1,9	14,4	5,5	20,5	1,2	3,8	390,4	10,1	97,7	13,4	96,9	
15-mars-01	24		23		30		17,5	4,1	15,7	3,1	19,5	1,9	13,8	5,6	20,4	1,3	4,8	395,2	12,7	103,1	18,2	89,9	
16-mars-01	25		24		31		17,5	4,1	16,4	3,1	19,6	1,9	14,5	4,6	20,4	1,2	1,0	396,2	15,9	100,7	21,5	80,1	
17-mars-01	24		23		29		17,4	4,1	16,8	2,7	19,5	1,9	14,2	4,7	20,1	1,2	12,3	408,5	15,5	95,8	19,5	84,0	
18-mars-01	22		21		26		17,4	4,1	16,4	3,1	19,5	1,7	12,5	6,0	19,9	1,3	22,1	430,6	14,2	103,8	17,1	95,8	
19-mars-01	19		26		25		17,4	4,1	15,8	3,1	19,9	1,5	14,2	4,9	20,6	1,6	2,0	432,6	9,6	98,6	11,2	83,1	
20-mars-01	24		30		31		17,4	4,1	16,7	2,7	20,1	1,5	14,3	4,8	20,7	1,2	13,9	446,5	5,7	91,0	9,9	76,7	
21-mars-01	22		25		30		16,9	4,0	17,1	2,4	19,9	1,5	13,2	4,9	20,3	1,3	17,1	463,6	6,8	102,5	19,0	91,2	
22-mars-01	17		23		25		16,7	4,0	16,4	2,7	20,6	0,5	13,8	4,6	20,5	1,4	7,6	471,2	14,2	102,0	15,1	93,2	
23-mars-01	15		22		23		16,8	4,1	17,2	2,3	20,4	0,7					9,7	480,9	14,9	101,7	22,2	76,8	Aspiration d'eau dans les conduites

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
																							d'air : analyseur de biogaz HS
24-mars-01	15		21		21												18,6	499,5	17,4	94,8	19,0	85,5	
25-mars-01	13		22		22												9,1	508,6	14,5	102,9	9,3	100,5	
26-mars-01	14		23		21												3,8	512,4	9,5	95,7	13,2	82,1	
27-mars-01	12		20		20												3,2	515,6	10,3	91,1	18,8	73,6	
28-mars-01	8		17		14												5,1	520,7	14,0	97,0	15,5	88,8	
29-mars-01	9		19		14												30,3	551,0	13,4	97,6	13,7	98,4	
30-mars-01	8		20		15												3,6	554,6	12,3	101,6	14,8	93,6	
31-mars-01	7		16		14												14,7	569,3	8,9	96,6	20,0	83,5	
01-avr-01	8		16		13												6,2	575,5	15,7	95,2	23,9	77,0	
02-avr-01	9		17		14												2,4	577,9	13,7	101,7	30,3	62,3	
03-avr-01	9		19		14												7,3	585,2	24,6	79,0	21,6	72,8	
04-avr-01	10		24		19												10,6	595,8	17,9	83,6	18,1	73,1	
05-avr-01	7		20		15												9,5	605,3	12,3	95,1	17,6	74,0	
06-avr-01	8		21		16												7,6	612,9	16,0	97,9	20,0	86,4	
07-avr-01	8		18		14												8,7	621,6	17,0	99,9	19,3	71,0	
08-avr-01	8		19		14												3,8	625,4	12,9	96,5	18,5	72,7	
09-avr-01	6		16		13												6,6	632,0	14,5	84,2	18,9	98,9	
10-avr-01	8		18		15												7,9	639,9	17,0	96,9	17,1	87,1	
11-avr-01	7		18		14												5,8	645,7	13,5	101,0	15,7	91,0	
12-avr-01	8		18		14												4,6	650,3	11,3	94,3	17,1	71,2	
13-avr-01	8		17		15												2,0	652,3	12,2	89,1	13,1	71,8	
14-avr-01	8		19		14												3,0	655,3	7,9	83,7	13,2	69,2	
15-avr-01	6		15		11												22,8	678,1	11,8	101,9	18,5	83,5	
16-avr-01	5		13		11												11,4	689,5	12,8	99,2	15,4	89,5	
17-avr-01	6		14		11												1,4	690,9	12,0	93,0	16,1	71,9	
18-avr-01	4		11		9												7,9	698,8	11,9	87,0	14,9	71,0	
19-avr-01	5		12		10												5,8	704,6	8,2	98,5	12,5	81,0	
20-avr-01	5		12		9												7,4	712,0	7,3	98,5	13,4	87,7	
21-avr-01	6		13		10												2,8	714,8	8,5	102,2	17,1	69,1	
22-avr-01	6		12		10												2,0	716,8	8,8	98,3	17,5	71,3	
23-avr-01	5		12		9												2,7	719,5	9,4	93,8	21,7	57,7	
24-avr-01	5		10		7												16,8	736,3	14,2	90,8	20,2	85,2	
25-avr-01																	7,3	743,6	9,0	80,9	15,5	71,3	
26-avr-01	71		116		97												8,4	752,0	15,7	90,9	22,3	69,2	
27-avr-01	89		131		113												5,7	757,7	16,1	91,6	18,2	95,9	
28-avr-01	84		119		101												4,6	762,3	16,8	99,4	21,1	75,5	
29-avr-01	91		127		105												1,0	763,3	17,1	86,7	23,4	68,0	
30-avr-01	95		131		111												6,4	769,7	17,8	93,1	21,0	93,0	
01-mai-01	83		114		101												0,4	770,1	16,0	100,7	18,9	99,0	
02-mai-01	86		106		97												1,0	771,1	16,6	102,1	19,7	90,8	
03-mai-01	91		116		102												4,2	775,3	17,4	101,4	20,7	97,5	
04-mai-01	84		96		90												6,9	782,2	15,0	102,0	14,4	95,0	
05-mai-01	67		78		76												0,8	783,0	14,2	93,1	20,2	67,7	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
06-mai-01	61		76		78												0,2	783,2	12,0	87,3	19,8	69,3	
07-mai-01	73		83		75												9,6	792,8	15,3	91,1	24,7	61,9	
08-mai-01	75		71		69												0,6	793,4	17,4	85,4	24,0	70,6	
09-mai-01	80		90		81												2,0	795,4	18,7	84,4	30,6	70,4	
10-mai-01	90		93		90												2,3	797,7	21,6	95,1	35,1	60,5	
11-mai-01	93		91		91												7,8	805,5	22,1	94,6	35,9	51,1	
12-mai-01	91		88		89												0,8	806,3	22,8	86,5	35,6	52,3	
13-mai-01	89		83		86													806,3	25,4	79,8	35,8	54,5	
14-mai-01	75		69		75												5,8	812,1	19,6	95,4	17,6	100,6	
15-mai-01	58		57		61												10,7	822,8	17,2	99,8	25,8	73,5	
16-mai-01	57		55		63												11,4	834,2	19,5	100,9	21,2	93,6	Calibration
17-mai-01	122	122	118	118	142	142											0,0	834,2	19,7	95,2	21,7	67,2	
18-mai-01	140	120	136	118	169	151											2,4	836,6	15,6	88,6	18,9	88,0	Calibration j+2
19-mai-01	120	120	118	118	151	151											11,7	848,3	16,6	96,3	25,3	67,1	
20-mai-01	124	133	123	131	152	161											3,6	851,9	15,8	94,4	24,7	68,2	
21-mai-01	118	137	114	130	141	158											0,2	852,1	18,7	85,2	27,8	68,0	
22-mai-01	108	136	106	130	130	156											6,8	858,9	20,0	79,7	28,7	62,7	
23-mai-01	101	138	95	127	119	153											2,2	861,1	20,6	80,9			Calibration +5
24-mai-01	***138***	**138**	***127***	**127**	***153***	**153**												861,1	19,2	82,6	33,5	56,9	correction linéaire de 270/250=1,08 --> 1er juin
25-mai-01	***131***	***137***	***120***	***127***	***141***	**150**											0,8	861,9	22,4	83,8	30,4	65,1	
26-mai-01	***124***	***137***	***112***	***126***	***133***	**150**											2,0	863,9	20,4	93,0	33,3	66,7	
27-mai-01	***121***	***140***	***110***	***131***	***130***	**156**												863,9	23,8	83,7	29,5	74,7	
28-mai-01	***108***	***133***	***98***	***126***	***117***	**151**												863,9	23,0	91,4	34,4	69,8	
29-mai-01	***110***	***141***	***99***	***134***	***119***	**162**												863,9	25,7	81,6	32,7	54,4	
30-mai-01	***103***	***140***	***89***	***130***	***106***	**158**												863,9	20,5	84,8	34,0	51,4	
31-mai-01	***100***	***144***	***86***	***135***	***104***	**164**												863,9	24,6	72,4	27,0	58,3	
01-juin-01	***81***	***131***	***69***	***125***	***91***	**160**												863,9	18,8	90,1	24,0	69,8	Calibration j+9
02-juin-01	131	131	125	125	160	160											5,5	869,4	19,4	98,2	20,2	91,3	
03-juin-01	143	146	138	139	165	168												869,4	14,6	91,0	19,5	76,3	
04-juin-01	136	141	106	108	152	158											1,8	871,2	12,4	98,9	22,4	77,7	
05-juin-01	136	144	121	125	150	159											10,6	881,8	15,0	99,9	31,2	55,4	
06-juin-01	131	141	109	114	135	148											2,9	884,7	23,1	80,1	26,8	73,1	
07-juin-01	107	120	89	95	117	133											3,6	888,3	19,9	86,5	23,3	71,0	
08-juin-01	104	119	89	96	110	129											2,4	890,7	17,8	101,1	25,6	61,4	
09-juin-01	113	131	91	100	113	135											2,2	892,9	14,3	89,5	25,8	57,8	
10-juin-01	103	123	87	97	105	130											0,8	893,7	15,8	90,2	20,5	84,9	
11-juin-01	97	120	81	92	106	134											1,4	895,1	16,0	96,9	24,7	63,9	
12-juin-01	94	119	67	79	93	125											10,7	905,8	20,6	76,3	27,8	62,7	
13-juin-01	96	124	65	79	91	126											9,4	915,2	19,4	84,2	26,9	78,6	
14-juin-01	89	119	63	78	92	130											0,2	915,4	17,5	102,7	30,7	66,3	
15-juin-01	97	130	61	77	90	131											3,0	918,4	25,0	84,8			Calibration j+ 14
16-juin-01	130	130	77	77	131	131											2,0	920,4	19,6	96,6	27,0	75,7	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
17-juin-01	119		76		119												2,7	923,1	20,8	99,7	20,4	100,0	
18-juin-01	117		73		110													923,1	19,0	93,1			
19-juin-01																		923,1					Données perdues -> 4/7
20-juin-01																		923,1					
21-juin-01																		923,1					
22-juin-01																		923,1					
23-juin-01																		923,1					
24-juin-01																		923,1					
25-juin-01																		923,1					
26-juin-01																		923,1					
27-juin-01																		923,1					
28-juin-01																		923,1					
29-juin-01																		923,1					
30-juin-01																		923,1					Coupure alimentation ->4/07
01-juil-01																		923,1					
02-juil-01																		923,1					
03-juil-01																		923,1					
04-juil-01																	1,8	924,9					Calib.- Relance prog et écrasement données eaux très sales- Installation biogaz
05-juil-01	144	144	94	94	152	152											15,5	940,4	22,4	92,1	33,7	77,6	Pas de purge pour évacuer les MES
06-juil-01	119	172		104		151											0,0	940,4	24,0	106,0	33,9	74,0	Calibration et purgePz9A (sable) -Enlèvement piège eau du biogaz
07-juil-01	172	172	104	104	151	151											30,5	970,9	28,9	92,7	25,0	93,5	
08-juil-01	118	131	63	73	101	114											2,3	973,2	24,0	103,0	24,5	91,9	
09-juil-01	90	116	50	70	80	106											2,8	976,0	23,1	87,8	26,5	80,0	
10-juil-01	95	134	53	83	78	117											2,4	978,4	22,2	98,7	29,4	79,5	
11-juil-01	75	127	30	70	55	106											7,8	986,2	23,4	87,5	27,1	70,7	
12-juil-01	64	129	21	71	45	109											4,9	991,1	22,3	82,3	25,5	77,3	
13-juil-01	45	123	13	73	32	109											0,2	991,3	20,1	95,8	27,4	71,5	
14-juil-01	51	141	18	88	35	125											5,4	996,7	21,2	95,7	19,8	102,9	
15-juil-01	30	133	2	82	18	121											4,6	1001,3	19,7	94,4	23,9	87,9	
16-juil-01	26	142	2	92	15	131											0,0	1001,3	18,7	101,5	28,5	68,0	
17-juil-01	27	156	0	100	12	140											1,0	1002,3	18,9	98,9	29,6	68,1	
18-juil-01	16	158	-2	108	9	150											27,7	1030,0	23,4	98,0	21,9	99,9	
19-juil-01	10	165	-11	109	1	155											5,1	1035,1	21,7	95,3			Calibration -Modif échelle Fluo- Inst anal pollution air - Ppe air HS
20-juil-01	165	165	109	109	155	155											1,2	1036,3			24,6	84,2	Colmatage chronique et pollution cellule entre par eau stagnante sale

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
21-juil-01	167	173	107	111	156	162											1,8	1038,1	19,0	101,1	27,2	87,7	
22-juil-01	174	185	120	128	168	180											0,4	1038,5	25,7	92,5	32,5	80,4	
23-juil-01	181	198	125	137	164	181											18,9	1057,4	26,4	91,9	30,4	86,4	
24-juil-01	168	191	114	130	150	173											0,0	1057,4	25,9	101,0	32,6	78,0	
25-juil-01	152	180	104	124	126	155											1,6	1059,0	24,2	100,3	35,0	74,1	
26-juil-01	149	183	106	130	130	165											0,4	1059,4	27,1	95,4	33,8	82,4	
27-juil-01	140	180	97	125	117	158											8,9	1068,3	25,6	99,1	37,6	72,1	
28-juil-01	149	194	105	137	125	171											0,8	1069,1	29,6	94,8	35,3	77,2	
29-juil-01	120	171	81	117	104	156											0,2	1069,3	24,1	97,4	36,6	66,1	
30-juil-01	126	182	91	131	106	164											0,6	1069,9	27,4	96,1	40,3	64,4	
31-juil-01	132	194	96	140	112	176											5,2	1075,1	30,3	92,3	34,5	74,2	
01-août-01	98	166	65	113	83	152											1,0	1076,1	25,3	92,7	31,5	69,3	
02-août-01	88	161	61	113	75	150											11,7	1087,8	23,8	90,8	35,3	76,5	
03-août-01	76	155	53	109	71	152											6,2	1094,0	26,9	100,7	32,6	73,6	Calibration - redémarrage pompe air
04-août-01	155		109		152		17,0	4,6	10,4	8,1	16,0	4,2	5,8	14,4	16,0	3,9	5,5	1099,5	23,2	102,0	27,5	76,8	absence de maintenance sur 1 mois
05-août-01	118		84		121		17,0	4,1	10,0	7,5	16,1	3,7	5,8	13,3	16,1	3,5	4,2	1103,7	23,1	91,6	29,7	67,8	
06-août-01	124		90		121		16,8	4,2	9,9	7,3	16,0	3,7	5,8	12,9	16,3	3,2	1,8	1105,5	24,6	90,5	27,9	86,1	
07-août-01	93		71		100		16,9	3,8	9,8	7,3	15,9	3,6	5,9	12,6	16,5	3,1	20,5	1126,0	24,5	93,2	28,8	88,6	
08-août-01	78		53		57		16,6	3,8	9,2	7,2	15,8	3,3	6,1	12,0	16,0	3,1	8,4	1134,4	20,8	104,9	27,1	78,2	
09-août-01	54		29		50		16,7	3,7	9,4	7,0	16,0	3,3	5,8	12,0	16,2	3,0	2,8	1137,2	21,4	100,1	26	79,6	
10-août-01	41		23		47		16,9	3,8	9,6	7,0	16,2	3,3	5,8	12,1	15,8	3,1	1,0	1138,2	20,6	92,4	25,4	82,2	
11-août-01	41		16		32		16,9	3,5	10,2	6,9	16,4	3,3	5,7	12,1	16,2	3,1	3,3	1141,5	18,7	99,2	29,5	69,9	
12-août-01	58		31		47		16,6	3,8	10,1	6,9	16,2	3,3	5,7	12,2	16,4	3,1	0,6	1142,1	22,9	90,4	32,9	66,1	
13-août-01	64		40		61		16,3	3,8	9,8	6,9	16,0	3,3	5,8	12,2	16,7	2,7	12,8	1154,9	26,4	72,1	34,5	71,8	
14-août-01	79		46		64		16,2	4,0	10,1	7,0	16,0	3,4	5,8	12,4	16,1	3,1	1,6	1156,5	24,2	96,6	39,5	63,5	
15-août-01	98		71		86		16,0	4,2	10,7	6,7	16,0	3,5	6,0	12,4	16,1	3,1		1156,5	27,2	97,9	39,8	68,9	
16-août-01	91		55		65		16,0	4,2	10,4	6,9	16,0	3,4	6,1	12,2	16,6	3,0	0,6	1157,1	31,5	85,3	30,1	67,2	modification des débits
17-août-01	52		28		41		16,3	3,8			16,2	3,3	5,9	12,1	15,3	3,4	2,5	1159,6	20,7	98,3	33,6	61,5	
18-août-01	57		30		43		16,2	3,9	10,3	6,6	16,0	3,3	5,7	12,2	15,4	3,4	1,2	1160,8	21,7	99,3	35,7	70,2	
19-août-01	54		30		57		15,9	3,8	10,4	6,5	16,0	3,3	6,4	11,6	14,9	3,4	8,6	1169,4	26,7	101,3	30,8	73,2	
20-août-01	44		23		38		16,1	3,8	10,0	6,6	16,2	3,3	6,3	11,6	15,8	3,0	3,2	1172,6	23	100	30,3	76,3	
21-août-01	36		14		25		16,4	3,8	10,3	6,6	16,4	3,3	6,1	11,7	15,6	3,2	2,6	1175,2	21,8	99,3	33,6	70,7	
22-août-01	49		37		44		16,5	3,8	10,7	6,4	16,4	3,3	6,1	11,9	15,7	3,3		1175,2	24,5	99,3	35,8	69,6	
23-août-01	60		38		43		16,4	3,8	11,0	6,2	16,3	3,3	5,9	12,0	16,0	3,1	1,8	1177,0	27	91,9	38,2	63,4	
24-août-01	53		32		47		16,4	3,8	10,8	6,5	16,3	3,3	5,9	12,0	16,1	3,1	1,5	1178,5	26,7	98,2	40,6	59,5	
25-août-01	59		35		43		16,4	3,8	10,9	6,2	16,3	3,3	5,9	12,1	16,0	3,1	2,6	1181,1	27	99	42,1	61,2	
26-août-01	69		44		50		16,3	4,1	11,3	6,3	16,2	3,5	5,6	12,5	16,1	3,1	6,2	1187,3	31,4	85,5	43,7	56,1	
27-août-01	67		47		45		16,5	3,8	11,6	6,1	16,4	3,3	5,7	12,1	15,3	3,4	3,8	1191,1	29,2	91,6	30,6	65,7	
28-août-01	33		13		21		16,9	3,4	11,8	5,7	16,6	3,2	5,9	11,6	15,5	3,4	5,2	1196,3	20	92,6	29,3	64,5	
29-août-01	19		0		13		16,8	3,4	11,8	5,7	16,6	3,2	5,8	11,5	15,6	3,2	0,2	1196,5	19,5	94,4	32,1	62,1	
30-août-01	14		-1		7		16,5	3,7	11,6	5,8	16,4	3,3	5,8	11,6	15,5	3,3	1,0	1197,5	19,9	95,1	28,9	74	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
31-août-01	10		-1		6		16,6	3,4	11,1	6,1	16,3	3,2	5,9	11,5	15,8	3,0	25,0	1222,5	22,3	91,8	22,6	99,7	
01-sept-01	4		-1		7		16,7	3,4	11,0	6,1	16,5	3,2	5,9	11,3	15,7	3,0	3,6	1226,1	19	104,3	27,4	75,4	
02-sept-01	10		-1		0		16,7	3,4	10,9	6,1	16,4	3,2	5,8	11,3	16,3	2,9	5,2	1231,3	19,3	98,7	23	103,6	
03-sept-01	5				6		16,3	3,4	10,5	6,2	16,1	3,2	5,8	11,3	16,2	2,7	18,5	1249,8	23,3	103	23,1	99,3	
04-sept-01							16,2	3,4	10,4	6,1	16,0	3,2	5,7	11,1	15,2	3,0	5,8	1255,6	20,2	105,5	21,6	95,5	colmatage eau (pas maintenance pendant 1 mois)
05-sept-01							16,1	3,6	10,2	6,5	16,2	3,2	6,0	11,0	15,2	3,0	0,8	1256,4	18,7	97,4	26,6	67,7	
06-sept-01							15,6	3,4			15,8	3,2	5,4	10,9	15,1	3,0	29,3	1285,7	20,9	90,5	26,4	86,8	Cellule endommagée, d'où calibration difficile et mesures aléatoires (non stables)
07-sept-01	295		297		300		15,5	3,6	9,9	5,9	15,9	3,2	6,5	10,1	14,7	3,0	2,0	1287,7	19	101,2	26,4	77,2	saturation sortie analogique fluo à 300µg/L (1 V) Données perdues
08-sept-01	300		300		300		14,9	3,8	9,3	6,1	15,6	3,2	7,2	9,8	14,0	2,9	2,8	1290,5	23,3	96,7	24,1	79,3	
09-sept-01	300		300		300		14,9	3,7	9,5	6,1	15,6	3,1	7,8	9,3	13,6	3,2	15,9	1306,4	15,9	101,2	21,3	75,3	
10-sept-01	288		259		300		14,6	3,6	9,2	6,2	15,6	3,1	7,6	9,2	13,7	3,1	10,5	1316,9	15,7	102,7	21	83,4	
11-sept-01	250		246		297		14,4	3,8	9,8	5,8	15,6	2,9	7,9	8,8	14,4	3,0	3,6	1320,5	16,8	93,5	21,9	103	
12-sept-01	300		300		300		14,1	3,8	10,2	5,8	15,6	2,9	8,5	8,7	14,6	2,9	3,8	1324,3	19,7	100,9	25,2	79,8	Pose piège à eau
13-sept-01	300		300		300		13,6	3,7	9,5	6,1	15,1	3,1	8,5	8,4	14,7	2,6	11,5	1335,8	20,8	95,3	23,2	83,5	
14-sept-01	265		268		300		17,0	2,2	15,6	2,7	18,1	2,0	15,0	3,4	17,2	2,0	5,4	1341,2	17,2	100,8	20,6	96,9	Aspiration air extérieur analyses biogaz fausses
15-sept-01	288		255		300		17,3	2,2	15,8	2,7	18,2	2,0	15,2	3,4	17,4	2,0	5,0	1346,2	18,1	96,5	24,2	77,8	
16-sept-01	300		290		300		17,0	2,2	15,8	2,7	18,3	2,0	15,5	3,4	17,1	2,0	17,9	1364,1	19	94,1	16,7	102,4	
17-sept-01	300		300		300		16,5	2,3	15,4	2,7	18,0	2,0	15,1	3,4	16,5	2,0	18,7	1382,8	15,1	104,4	19,6	96,7	
18-sept-01							16,6	2,2	15,9	2,4	18,0	1,8	16,6	2,4	15,7	2,0	19,3	1402,1	17,3	104,2	20	92,4	
19-sept-01							16,1	2,1	15,3	2,3	17,5	1,9	15,9	2,7	16,2	2,0	23,7	1425,7	16,1	98,8	20,1	106	Calibration - Essai visu SIM - Régul débit par lim press - Sortie Fluo 500µg/L
20-sept-01	185		360		295		15,6	2,2	14,2	2,4	16,7	2,0	16,7	2,5	15,8	2,0	20,0	1445,7	18,8	102,1	22,4	99,9	Visite SIM - Enlev. piège eau - Reset Datataker
21-sept-01	205		370		330		11,1	4,2	7,8	4,9	13,3	3,1	13,4	4,7	12,4	3,3	14,1	1459,8	17,6	100,7	21,2	94,3	
22-sept-01	257		430		410		11,1	4,6	8,2	4,8	13,6	3,0	13,3	4,7	12,3	3,2	7,4	1467,2	15,3	104	24,7	76,1	
23-sept-01	235		390		360		11,0	4,2	8,5	5,1	13,8	2,8	11,9	5,7	13,0	2,9	9,3	1476,5	13,8	103,5	20,9	97,5	
24-sept-01	245		400		380		11,0	4,5	9,1	5,1	14,0	2,8	12,9	5,4	13,9	2,9	31,9	1508,4	15,3	104,3	23,7	81,8	Retour Fluo en labo pour essais car mesures aléatoires (non stables)
25-sept-01							11,5	4,3	9,6	5,1	14,3	2,9	13,3	5,4	14,4	2,9	6,6	1515,0	15,1	104	22,3	89,4	
26-sept-01							11,6	4,5	9,9	5,4	14,6	3,0	13,5	5,4	15,4	2,8	24,2	1539,3	15,2	104,7	20,5	97,4	Installation 2ème Fluo cellule propre, lampe neuve et calibré
27-sept-01	74		138		144		11,3	4,3	9,8	5,3	14,5	2,9	13,5	5,3	17,2	2,4	1,6	1540,9	21,1	103,3	25,6	89,6	
28-sept-01	72		131		134		11,3	4,6	10,0	5,4	14,6	3,0	13,5	5,2	17,0	2,4	4,0	1544,8	19,4	100,6	28,6	77,6	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
29-sept-01	69		124		126		11,3	4,5	10,7	5,1	14,5	2,9	13,3	5,0	16,5	2,5	24,7	1569,5	19,8	99,5	21,8	105	
30-sept-01	66		119		119		11,4	4,4	10,3	5,1	14,6	2,9	13,4	5,1	17,1	2,5	7,6	1577,1	21	105	25,5	87,6	
01-oct-01	63		109		112		10,5	4,5	8,9	5,4	14,6	2,9	13,1	5,3	17,0	2,5	5,8	1582,9	24,2	93,4	25,5	93,9	
02-oct-01	59		100		104		10,2	4,5	8,4	5,7	14,5	3,2	13,0	5,4	16,4	2,6	17,5	1600,4	24,3	92,5	31,1	79,8	Calibration stand 203->270 - Colmatage exhaure (ragondin) rupture conduite
03-oct-01							10,0	4,8	8,0	5,5	14,4	3,2	12,8	5,4	16,7	2,5	11,5	1611,9	21,2	101,3	25,1	84,5	Pompes arrêtées attente réparation
04-oct-01							10,5	4,6	8,9	5,4	14,8	2,9	12,8	5,4	17,0	2,5	2,8	1614,7	19,8	97,3	24,2	82,6	
05-oct-01							10,4	4,9	9,6	5,4	14,7	2,9	13,0	5,3	16,8	2,5	8,4	1623,1	18,9	96,3	27,8	74,4	
06-oct-01							10,3	4,7	10,2	5,1	14,9	2,8	13,3	5,1	17,2	2,4	23,3	1646,4	23,7	86,8	25,1	93,5	Anomalie pluviomètre écart de 31,63mm
07-oct-01							10,2	4,5	8,7	5,1	14,2	2,8	13,4	4,5	16,6	2,5	7,0	1653,3	22,2	99	26,8	76,8	
08-oct-01							9,3	4,6	7,0	5,7	14,7	2,8	14,0	4,2	15,9	2,5	3,1	1656,4	20,1	96,2	24,7	79,9	
09-oct-01							9,0	4,8	7,0	6,1			13,3	5,1	16,7	2,9	3,4	1659,8	20,3	92,9	23,7	82,8	Recalibration biogaz CO2 62->50%, O2 20,1->20,9%
10-oct-01							11,1	5,7	7,8	7,5	16,2	3,7	14,7	6,2	17,5	2,9	2,6	1662,4	21,4	90,5	25,6	72,2	
11-oct-01							12,0	5,7	9,9	7,3	16,8	3,5	14,7	6,1	17,8	2,9	6,2	1668,6	18,3	96,3	26	101,7	
12-oct-01							12,3	6,1	10,7	7,0	16,9	3,6	14,6	6,1	17,2	2,9	0,8	1669,4	19,4	96,4	30,3	70,6	2h de données manquantes
13-oct-01							12,5	6,1	11,4	7,0	16,9	3,6	14,5	6,2	18,1	2,9	3,4	1672,8	23,2	99,3	32,3	79,7	
14-oct-01							12,8	6,1	11,4	6,8	16,8	3,6	14,4	6,2	18,1	2,9	8,6	1681,4	21,4	103,3	26	89,4	
15-oct-01							12,8	6,1	10,9	7,0	16,7	3,6	14,4	6,2	18,3	2,9	5,8	1687,2	23,4	94,4	29,2	79,8	
16-oct-01							13,3	6,1	11,1	7,1	17,2	3,6	14,8	6,2	18,2	2,9	8,4	1695,6	24,1	89,8	24,5	81,1	
17-oct-01							13,6	6,1	11,3	7,0	17,0	3,6	14,5	6,1	17,8	2,9	8,0	1703,6	16,5	103,1	27,5	83,6	
18-oct-01							13,4	6,1	11,6	6,7	16,8	3,6	14,1	6,1	18,1	2,9	2,4	1706,0	20,7	99,4	22,7	100,4	
19-oct-01							13,7	6,1	11,4	7,0	16,8	3,6	14,2	6,2	17,9	2,9	9,0	1715,0	17,4	104,6	26,4	88,4	
20-oct-01							13,5	6,1	12,5	6,5	16,8	3,6	14,0	6,3	18,1	2,9	8,6	1723,6	23	99,4	24,6	89,8	
21-oct-01							13,6	6,1	11,9	6,6	16,8	3,5	14,0	6,1	17,8	2,9	6,2	1729,8	20,3	104,9	22,2	96,9	
22-oct-01							14,2	5,7	11,1	7,3	16,9	3,5	14,4	6,1	17,8	2,9	6,2	1736,0	21,1	96,4	23	86,2	
23-oct-01							14,2	6,1	11,5	7,1	16,9	3,6	14,2	6,2	18,1	2,9	11,3	1747,3	19,2	100,4	21,1	104	Vérif du biogaz, 2h de données manquantes
24-oct-01							14,8	5,6	12,2	6,9	17,3	3,3	14,0	6,1	18,2	2,8	7,8	1755,1	18,3	104,6	20,6	98,7	
25-oct-01							14,7	5,7	11,6	7,3	17,3	3,3	14,3	6,1	18,3	2,9	12,1	1767,2	19,5	99,7	23,4	95,2	
26-oct-01							14,5	5,7	11,7	7,3	17,1	3,3	13,8	6,1	18,2	2,9	5,2	1772,4	21,1	92,8	21,4	90,7	
27-oct-01							13,9	5,7	11,7	7,3	17,1	3,5	13,9	6,2	18,2	2,9	1,8	1774,2	19,5	97,3	22,2	89,2	
28-oct-01							14,1	6,0	12,2	7,3	17,3	3,6	14,1	6,2	18,1	2,9	2,6	1776,8	18,1	101,9	21,6	92,3	
29-oct-01							14,3	6,1	12,6	7,0	17,3	3,6	14,0	6,2	18,1	2,9	3,2	1780,0	16	104,5	22,2	90,7	
30-oct-01							14,3	5,7	12,6	7,3	17,1	3,6	14,0	6,2	18,0	2,9	0,4	1780,4	20,4	93,4	24,3	84,6	Remplacement canalisation exhaure
31-oct-01							13,4	6,1	10,9	8,0	16,9	3,7	14,1	6,2	18,4	2,7	3,6	1784,0	23,3	92,1	21,8	73,8	
01-nov-01							13,9	6,1	11,5	8,1	17,5	3,7	14,6	6,2	18,2	2,9	0,6	1784,6	15,5	84,6	20,4	74,3	
02-nov-01							14,0	6,1	12,2	7,8	17,7	3,6	14,7	6,3	18,3	3,3	4,0	1788,6	10,8	102,4	20	81,7	
03-nov-01							14,0	6,1	12,4	7,8	17,5	3,6	14,5	6,3	18,3	3,3	3,2	1791,8	10,2	102,9	18,2	91,7	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
04-nov-01							13,9	6,1	12,5	7,4	17,2	3,6	14,3	6,2	18,3	2,9	6,0	1797,8	9,6	103,3	18,1	89,4	
05-nov-01							14,1	6,1	12,4	7,4	17,3	3,6	14,6	6,1	18,6	2,9	2,6	1800,4	13,6	104,2	17,8	85,2	
06-nov-01							14,2	5,7	12,1	7,3	17,0	3,4	14,4	5,7	18,3	2,9	9,0	1809,4	10,8	99,5	17,7	103,2	Installation Fluo et programmation purges piézomètres. Fluo calibré
07-nov-01							13,9	5,7	11,7	7,4	16,7	3,6	14,4	5,7	18,4	2,5	6,4	1815,8	15,8	99,1	18,7	101,6	
08-nov-01							13,2	5,7			14,9	3,7	11,8	6,1	16,9	2,9	51,0	1866,8	16,8	102,5	11	95,4	Relance analyses Fluo
09-nov-01	78	78	140	140	126	126	13,3	6,1	9,2	7,2	16,2	3,3	15,2	4,8	17,8	2,9	15,9	1882,7	9,8	96,8	13,7	74	
10-nov-01	77	80	121	126	122	128	13,7	6,2	12,7	6,4	17,1	3,3	14,7	6,0	18,7	2,9	3,4	1886,1	4,4	102,4	12,8	74	
11-nov-01	73	79	110	119	117	128	13,7	6,2	13,1	6,3	17,2	3,3	15,4	5,4	18,8	2,9	5,6	1891,7	3,6	103,1	11,3	99,3	
12-nov-01	82	91	104	118	112	129	13,6	6,1	12,8	6,3	17,3	3,2	15,3	5,3	19,1	2,5	4,0	1895,7	12	104,1	16,3	106,9	
13-nov-01	75	87	98	117	104	126	13,9	6,1	13,4	6,0	17,6	3,0	15,7	5,0	18,9	2,5	10,8	1906,5	15,2	107	12,2	93,3	
14-nov-01	62	77	92	115	84	112	14,3	6,0	13,3	6,2	18,0	2,9	16,1	5,0	18,9	2,5	0,6	1907,1	9,2	100,6	13,6	82	Plus de stabilisation pour le Pz9A (corrigé en postraitement)
15-nov-01	58	76	86	114	87	121	14,7	5,9	13,9	6,2	18,5	2,9	16,4	4,8	19,1	2,7	8,2	1915,3	5,6	102	9	91,3	
16-nov-01	55	75	80	113	84	123	14,8	5,9	14,0	6,1	18,5	2,9	16,4	4,8	19,3	2,7	4,8	1920,1	3,2	104,1	10,8	105,5	
17-nov-01	58	81	75	113	75	120	14,7	5,8	14,0	5,9	18,3	2,8	16,3	4,7	19,4	2,5	0,6	1920,7	10,4	106,2	11,8	97,2	
18-nov-01	54	80	70	112	64	115	14,6	5,8	13,9	5,9	18,1	2,9	16,1	4,6	19,2	2,4	3,2	1923,9	9,7	99,2	12,5	89,6	
19-nov-01	47	76	65	112	61	117	14,7	5,7	13,8	5,8	18,3	2,8	16,4	4,3	19,1	2,4	0,8	1924,7	6,5	107,2	12,6	91,1	
20-nov-01	47	79	60	112	60	122	14,9	5,7	14,1	5,8	18,4	2,9	16,6	4,5	19,5	2,5	0,8	1925,5	9,6	104	14,9	92	
21-nov-01	41	76	55	111	57	124	15,1	5,4	13,8	5,8	18,3	2,8	16,5	4,2	19,4	2,5	5,0	1930,5	13	95,5	14,8	84,5	
22-nov-01	38	76	50	111	50	123	14,8	5,3	12,3	6,5	17,8	2,9	15,7	4,4	18,9	2,4	10,0	1940,5	12,4	91	15,5	88	Calibration Fluo étalon 249µg/L 98->135->249µg/L
23-nov-01	76	76	111	111	123	123	15,0	5,8	12,2	6,9	18,0	2,9	16,4	4,6	19,0	2,5	3,8	1944,3	8,8	101,7	10,5	101,3	
24-nov-01	70	75	102	109	118	125	14,8	5,7	12,9	6,6	17,9	3,1	15,9	4,6	18,9	2,5	7,4	1951,7	9,9	96,1	15,1	106,4	
25-nov-01	69	79	98	111	114	128	14,7	5,7	13,3	6,2	17,8	3,0	15,5	4,6	19,2	2,4	3,2	1954,9	15,4	107,1	17,7	98,1	
26-nov-01	64	78	95	115	109	130	14,5	5,7	12,9	6,0	17,6	2,9	15,3	4,6	18,7	2,4	8,6	1963,5	15,7	104,3	13,3	103,3	
27-nov-01	56	75	96	123	104	132	14,6	5,7	13,4	5,5	17,7	2,8	15,3	4,6	18,3	2,4	1,0	1964,5	5,5	105	13,3	93,6	
28-nov-01	51	75	94	127	100	135	14,4	5,7	12,7	5,8	17,8	2,9	16,4	4,5	18,7	2,4	1,4	1965,9	13,6	100,3	13,8	88,4	
29-nov-01	45	74	86	126	93	135	14,5	5,3	12,9	5,5	17,9	2,8	16,6	4,2	18,5	2,4	11,9	1977,8	11,8	98,1	15,6	102,6	
30-nov-01	42	75	84	131	88	136	14,1	5,3	11,7	5,5	17,8	2,8	16,9	3,6	19,1	2,4	7,0	1984,8	16,9	104,7	19	105,1	
01-déc-01	39	77	84	138	83	138	14,1	5,3	12,0	5,1	17,4	2,8	16,9	3,5	18,8	2,4	2,2	1987,0	19,4	101,4	19,3	99,9	
02-déc-01	35	78	78	138	78	140	14,5	5,4	13,4	5,1	18,5	2,8	17,2	3,5	19,0	2,4	7,8	1994,8	12,2	104,4	15	101,4	
03-déc-01	31	79	70	137	72	141	14,5	5,4	13,8	4,8	18,5	2,4	16,9	3,8	19,1	2,4	15,5	2010,3	13,7	104,3	15,8	107,3	
04-déc-01	25	77	73	147	66	142	14,2	5,3	13,5	4,5	18,4	2,4	16,8	3,5	18,7	2,4	5,4	2015,7	16	102,5	17,3	91	
05-déc-01	22	79	66	146	62	145	14,4	5,4	14,0	4,4	18,8	2,4	16,9	3,5	18,9	2,4	6,4	2022,1	12	99,3	16,8	102,6	
06-déc-01	19	81	59	146	57	147	14,4	5,6	13,5	5,0	19,6	2,0			19,0	2,2	6,0	2028,1	15,9	86,6	16	85,2	Calibration Fluo étalon 246µg/L 103-> 130-> 246 µg/L
07-déc-01	81	81	146	146	147	147	14,8	5,4	15,0	4,4	19,1	2,4	17,1	3,5	19,3	2,4	3,8	2031,9	6,1	104	12,5	93,7	
08-déc-01	79	83	139	143	143	147	15,1	5,0	15,4	4,3	19,3	2,4	17,3	3,5	19,6	2,4	3,2	2035,1	6,2	104,3	9,5	95,6	
09-déc-01	76	83	133	141	139	148	15,3	5,0	15,5	4,3	19,4	2,4	16,6	4,2	19,8	2,4	2,0	2037,1	4	103,7	8,7	91,5	

	Pz18A		Pz19A		Pz9A		G1		G2		G3		G4		G5								
Dates	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	Fluo brute	Fluo Corrigée	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	% O2	% CO2	Pluie journalière	Accumulation pluie annuelle	Température (00h00)	Humidité (00h00)	Température (16h00)	Humidité (16h00)	Remarques
10-déc-01	73	84	127	139	135	148	15,5	5,0	15,6	4,3	19,4	2,4	17,0	4,0	19,8	2,4	2,4	2039,5	4	102,7	12,2	72,5	
11-déc-01	71	85	122	138	131	149	15,6	5,0	15,6	4,3	19,4	2,4	17,2	3,9	19,9	2,4	2,6	2042,1	4,7	97,8	8,5	109,8	
12-déc-01	69	87	117	137	126	148	15,7	4,8	15,4	4,2	19,3	2,4	17,1	3,7	19,8	2,0	2,4	2044,5	9,5	107	10,6	96,2	
13-déc-01	68	90	110	134	122	148	15,9	4,6	15,4	4,1	19,3	2,1	17,2	3,5	19,8	2,0	2,8	2047,3	8,3	102	9,3	82,4	
14-déc-01	66	91	103	132	115	146	16,3	4,1	15,6	3,9	19,4	2,1	17,5	3,1	20,0	2,0	7,8	2055,1	4,8	83,2	5,2	74	
15-déc-01	65	94	97	130	110	145	16,5	4,2	15,7	3,9	19,3	2,0	17,4	3,1	19,9	2,0	3,0	2058,1	1,5	89,1	7	76	
16-déc-01	67	100	95	132	108	147	16,6	4,2	15,8	3,9	19,3	2,0	17,1	3,5	20,0	2,0	4,4	2062,5	5,6	97,1	8,1	79	
17-déc-01	67	103	90	131	104	148	16,7	4,3	15,9	4,3	19,2	2,4	17,2	3,5	20,0	2,0	5,6	2068,1	2,7	99,2	5,7	99,5	
18-déc-01	67	107	86	131	100	148	16,7	4,6	15,8	4,3	19,1	2,4	17,3	3,5	20,1	2,0	0,0	2068,1	5,5	104,6	8,1	101,5	
19-déc-01	66	109	83	132	95	148	16,7	4,2	15,6	4,3	18,9	2,4	17,0	3,5	20,0	2,0	2,2	2070,3	7,7	104,8	10,8	92,9	
20-déc-01	65	112	80	133	91	148	16,8	4,2	15,5	4,2			16,9	3,2	19,8	2,0	1,4	2071,7	9,1	95,9	11	82,8	Calibration Fluo
21-déc-01	112		133		148													2071,7	4,8	102,6			
22-déc-01																		2071,7					

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL SUPERIEUR DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON ET L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Nom : PORTET
Prénom : Frédéric

Date de soutenance : 15 janvier 2004

Titre : MONITORING CONTINU DE SITE POLLUE
Mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou en phase de dépollution

Nature : Doctorat

Cote BIU Lyon : T50/210/2004/

Résumé :

Le Monitoring Continu de Site Pollué (MCSP), développé au cours de ce travail, a pour but la mise au point d'un outil de gestion en temps réel et à distance de l'évolution d'une pollution HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) dans un aquifère superficiel issu de l'activité charbonnière. Pour l'expérimentation en vraie grandeur, une ancienne friche de cokerie a été instrumentée (capteurs, analyseurs, central d'acquisition, automate, etc..) en juin 2000. Son suivi est assuré par un pilotage à distance via une connexion télécom.

Le Monitoring Continu de Site Pollué est une nécessité pour le contrôle de l'évolution des pollutions et donc des risques induits sur l'homme et l'environnement. En raison des faibles vitesses de propagation d'une contamination aux HAP, on se satisfaisait généralement d'investigations ponctuelles en fait incomplètes et non représentatives de la réalité et masquant certains aspects particulièrement intéressants comme l'activité de biodégradation. Le suivi continu en temps réel de l'évolution naturelle d'une pollution HAP dans l'aquifère superficiel ou les sols avec une confrontation avec l'évolution des paramètres généraux (météo, pluies, etc..) n'a jamais été conduit.

Ce MCSP expérimental permet de mettre en évidence des corrélations entre l'évolution de la pollution et les conditions météorologiques. Pour l'activité de biodégradation naturelle déduite des mesures de biogaz en zone non saturée, une forte activité a été observée les saisons chaudes (consommation d'oxygène et dégagement de dioxyde de carbone) et une nette diminution en hiver. Pour l'analyse quotidienne des HAP dans les eaux de l'aquifère, un fluorimètre UV de terrain est utilisé. Calibré avec du naphtalène (HAP le plus soluble), la fluorescence des eaux est donnée en µg/L équivalent naphtalène, mais nécessite un postraitement afin de corriger la dérive de l'analyseur entre deux calibrations. Par la suite, les données mesurées et traitées sont restituées et exploitées au moyen d'un outil intégré, constitué d'un SIG (Système d'Information Géographique), interconnecté à une base de données et à un modèle de transport de polluant. Les résultats sont présentés sur un synoptique convivial et ergonomique servant de support d'aide à la décision. Les gestionnaires de sites pollués peuvent ainsi visualiser toutes les informations enregistrées sur l'évolution de la pollution et donc facilement identifier les indicateurs pertinents à confronter aux paramètres généraux (météo, etc..) ou aux différents scénarii de simulation de transport de polluants.

Mots clés : sites industriels contaminés, surveillance en temps réel, modélisation

ISBN 2-9507146-3-3

Laboratoires de recherche :
Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués (CNRSSP) de Douai
Centre Sciences Information et Technologies pour l'Environnement (SITE) de l'ENSM-SE

Directeur de thèse : M. Jacques BOURGOIS Co-directeur de recherche : M. Konrad SZAFNICKI

Président du jury : M. Jean ROUSSY

Composition du jury :
Rapporteurs : Mme Colette COLLET-GONNET, M. Jean ROUSSY
Examinateurs : Mme Agnès LABOUDIGUE, M. Jacques BOURGOIS, M. Rémy GOURDON, M. Konrad SZAFNICKI
Invités : Mlle Martine LOUVRIER, M. Jacques LAVERSANNE