



Etude sur l'origine du marquage par l'uranium dans la nappe alluviale de la plaine du Tricastin

DEI/2010-004



DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION

Demandeur	
Référence de la demande	
Numéro de la fiche programme	1500 0441 0010
Processus de rattachement	R 5

**Etude sur l'origine du marquage par l'uranium dans la
nappe alluviale de la plaine du Tricastin**

DEI/ 2010-004

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur	Chef du SARG	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN *
Noms	S. BERNARD <i>et al.</i>	V. REBOUR J-C. GARIEL	D. GAY	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates					
Signatures					

DIFFUSION : Libre Interne Limitée

*si nécessaire

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme

PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS A L'ETUDE ET A LA REDACTION DU RAPPORT

J-C. Gariel	IRSN/DEI
V. Rebour	IRSN/DEI/SARG/BEHRIG
S. Bernard	IRSN/DEI/SARG/BEHRIG
G. Ielsch	IRSN/DEI/SARG/BRN
E. Cushing	IRSN/DEI/SARG/BERSSIN
L. Pourcelot	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
L. Saey	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
B. Boulet	IRSN/DEI/STEME/LMRE
A. Mifsud	IRSN/DEI/SARG/LAME

Par ailleurs les commentaires apportés par les contributeurs suivants ont été insérés dans le document

P. Florens	AREVA NC
J. Petit	AREVA NC
B. Vitry	ARS 26
C. Callens	ARS 84
S. Garcia	ARS 84
J-L. Lasalle	Cire InVS
A. Girard	DSND
A. Reme	LDA26
G. Le Dinaet	CFDT

RESUME

ABSTRACT

MOTS-CLES

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	6
2 CARACTERISATION DU SECTEUR D'ETUDE ET DU MARQUAGE DE LA NAPPE PAR L'URANIUM	9
2.1 ZONE D'ETUDE	9
2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL.....	11
2.3 DESCRIPTION DE L'HYDROLOGIE	15
2.3.1 Le Rhône	17
2.3.2 Le canal de Donzère-Mondragon	17
2.3.2.1 Canal d'aménagé	17
2.3.2.2 Canal de fuite	18
2.3.3 Les cours d'eau de la plaine.....	21
2.3.3.1 La Gaffière - Le Lauzon.....	21
2.3.3.2 La Mayre Girarde	21
2.3.3.3 Le Grand Béal - Le Petit Béal.....	21
2.4 DESCRIPTION DE L'HYDROGEOLOGIE DE LA PLAINE.....	21
2.4.1 Nappe des limons.....	22
2.4.2 Nappe des alluvions	22
2.4.3 Nappe des calcaires.....	28
2.5 RELATIONS ENTRE NAPPE ET RIVIERES	29
2.6 CARACTERISATION DU MARQUAGE EN URANIUM.....	33
2.6.1 Caractéristiques de l'uranium.....	33
2.6.2 L'uranium et ses descendants dans les eaux souterraines.....	35
2.6.3 Méthode et stratégie de prélèvements	36
2.6.4 Elaboration d'une base de données des résultats.....	38
2.6.5 Evolution temporelle de la concentration en uranium dans la nappe	41
2.6.5.1 Cas des forages privés suivis dans le cadre du plan de surveillance	41
2.6.5.2 Cas des forages mis en place le long du Lauzon à la suite de l'incident SOCATRI	43
2.6.6 Etude de la variation spatiale de la concentration en uranium dans la nappe du Tricastin ...	46
3 EXAMEN DES HYPOTHESES POUVANT EXPLIQUER LES CONCENTRATIONS ELEVEES EN URANIUM	49
3.1 1 ^{ERE} HYPOTHÈSE : ORIGINE LIÉE À LA GÉOLOGIE LOCALE	49
3.1.1 Formations géologiques régionales identifiées comme potentiellement riches en uranium ...	50
3.1.1.1 Lignites du Crétacé supérieur	50
3.1.1.2 Marnes ligniteuses de l'Eocène.....	50
3.1.1.3 Lignites de l'Oligocène	51

3.1.1.4 Marnes du Pliocène.....	51
3.1.1.5 Placers riches en minéraux lourds dans les alluvions quaternaires.....	52
3.1.2 Formations potentiellement riches en uranium reconnues au droit de la zone d'étude	52
3.1.3 Détermination des teneurs en uranium des échantillons solides	55
3.1.3.1 Prélèvements dans des formations analogues	55
3.1.3.2 Prélèvements in situ	56
3.1.4 Détermination du potentiel de relargage de l'uranium a partir des roches	57
3.1.5 Synthèse sur l'hypothèse géologique.....	59
3.2 2 ^{EME} HYPOTHESE : URANIUM PROVENANT D'ACTIVITES ANTHROPIQUES AUTRES QUE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE	60
3.2.1 Données disponibles sur les sites industriels.....	60
3.2.2 Utilisation de cendres, de machefers et d'engrais	62
3.2.3 Synthèse sur l'hypothèse d'une origine industrielle autre que le site nucléaire	64
3.3 3 ^{EME} HYPOTHESE : URANIUM PROVENANT DE REJETS DU SITE NUCLEAIRE DU TRICASTIN	64
3.3.1 Principales activités actuelles et passées sur le site nucléaire du tricastin	65
3.3.2 L'uranium dans la nappe au droit du site nucléaire	68
3.3.2.1 Situation actuelle	68
3.3.2.2 Situations anciennes	71
3.3.3 Etude de quelques traceurs de l'activité du site.....	72
3.3.3.1 Les traceurs chimiques	72
3.3.3.2 Les rapports isotopiques de l'uranium	74
3.3.3.3 Conclusion de l'étude des traceurs de l'activité du site nucléaire.....	76
3.3.4 Etude des transferts dans la nappe alluviale	77
3.3.4.1 Analyse des données hydrogéologiques	77
3.3.4.2 Présentation des résultats des modélisations effectuées par ANTEA	80
3.3.4.3 Présentation des résultats de la modélisation effectuée par l'IRSN	83
3.3.4.4 Conclusion des études de modélisation hydrogéologique	88
3.3.5 Synthèse sur l'hypothèse d'une origine liée au site nucléaire.....	88
4 COMMENTAIRES DES MEMBRES DU GROUPE DE SUIVI.....	91
4.1 DELEGUE A LA SURETE NUCLEAIRE DE DEFENSE (DSND).....	91
4.1.1 Commentaires sur le fond.....	91
4.1.2 Commentaires sur le fonctionnement et le déroulement des travaux.....	91
4.2 LABORATOIRE DEPARTEMENTAL D'ANALYSE DE LA DROME (LDA26)	92
4.3 ANALYSE D'AREVA SUR LES RESULTATS ACQUIS DANS LE CADRE DE L'ETUDE	93
4.4 ARS RHONE-ALPES - ARS PACA - CIRE INVS	98
4.5 UNION DEPARTEMENTALE CFDT 26/07	99
5 CONCLUSION GENERALE	100
6 REFERENCES	105

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Composition du Groupe de Suivi
- Annexe 2 : Plan d'action de l'étude sur l'origine de l'uranium dans la nappe phréatique de la plaine du Tricastin
- Annexe 3 : Carte géologique du secteur d'étude
- Annexe 4 : Résultats des analyses en tritium de l'eau de nappe sur le site nucléaire et dans l'environnement
- Annexe 5 : Solution analytique du transfert de soluté
- Annexe 6 : Logs géologiques et techniques des ouvrages de la SNPA et d'AREVA
- Annexe 7 : Photos des affleurements de roches prélevés pour analyses des teneurs en uranium
- Annexe 8 : Fiche descriptive du site INB et INBS du Tricastin (hors CNPE) issue du rapport IRSN de 2008 pour le HCTISN
- Annexe 9 : Résultats des analyses chimiques et radiologiques réalisées dans l'eau de nappe du site nucléaire du Tricastin
- Annexe 10 : Cartes de répartition du bore et du fluor
- Annexe 11 : Résultats des analyses isotopiques réalisées sur les eaux de nappe dans la plaine du Tricastin et sur le site nucléaire de Pierrelatte
- Annexe 12 : Résultats des analyses isotopiques réalisées sur les eaux de nappe, les eaux de surface et les sédiments du site nucléaire de Pierrelatte et de son environnement depuis 1977

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude 9
- Figure 2 : Localisation du secteur d'étude et des communes.....10
- Figure 3 a,b,c et d : Schéma de la formation du canyon messinien dans la vallée du Rhône et de son remplissage par les marnes du Pliocène 12
- Figure 4 : Carte géologique du secteur d'étude et des massifs environnants. La légende des formations géologiques représentées sur cette carte est disponible en Annexe 2 14
- Figure 5 : coupe litho-stratigraphique régionale d'après [17] 15
- Figure 6 : Localisation des principaux cours d'eau et du réseau hydrographique secondaire (2009) 16
- Figure 7 : Schéma de principe des écoulements dans les digues et des collectes par les contre-canaux.....18
- Figure 8 : Schéma de principe des écoulements au voisinage du canal de fuite - influence du canal de réalimentation (contre-canal)..... 18
- Figure 9 : Localisation des puits d'infiltration de la CNR pour soutenir la nappe des alluvions 19
- Figure 10 : Plan des puits d'infiltration et des prises d'eau dans le canal de réalimentation 20

Figure 11 : Schéma de diverses configurations d'écoulements - Les lignes noires représentent les isopièzes - Les lignes bleues définissent le sens d'écoulement de la nappe.....	23
Figure 12 : Localisation des piézomètres dans la plaine du Tricastin (mars 2009)	25
Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe des alluvions dans la plaine du Tricastin (mars 2009) - Interprétation IRSN de la carte tirée de [19]	26
Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe des alluvions au droit du site nucléaire (mars 2009) - Interprétation IRSN de la carte tirée de [19]	27
Figure 15 : Localisation des points de mesures des débits en rivière (mars 2009) - Modifiée d'après [19]	31
Figure 16 : Carte synthétique des relations nappe / rivières (mars 2009) - Modifiée d'après [19]	32
Figure 17 : Chaîne de décroissance radioactive de l'uranium 238	34
Figure 18 : Exemples de captages dans la plaine du Tricastin. a) AEP particuliers ; b) AEP collectif ; c) piézomètres site.....	41
Figure 19 : Evolution temporelle des concentrations en uranium mesurées dans deux captages AEP de particuliers dans le cadre du Plan de Surveillance (juillet 2008 - juin 2009) et lors de l'étude conjointe IRSN/DDASS/AREVA (septembre 2007)	42
Figure 20 : Localisation des piézomètres implantés par AREVA en bordure du Lauzon en juillet 2008 ..	44
Figure 21 : Evolution temporelle des concentrations en uranium dans les piézomètres implantés en bordure du Lauzon	45
Figure 22 : Simulation des concentrations en uranium dans le piézomètre ET309 par une solution analytique	46
Figure 23 : Cartographie de la concentration en uranium dans la nappe du Tricastin obtenue dans le cadre de l'étude IRSN/DDASS/AREVA (2009).....	47
Figure 24 : Localisation des formations géologiques potentiellement riches en uranium	51
Figure 25 : Localisation des sondages de la SNPA - extension supposée des formations du Crétacé sous les alluvions.	54
Figure 26 : Evolution des taux de relargage pour différents temps de contact	59
Figure 27 : Catégories d'activités professionnelles mettant en œuvre des produits présentant une radioactivité naturelle et désignées par l'arrêté du 25 mai 2005 - répartition de 79 études reçues par l'IRSN [36] par secteurs d'activité.....	61
Figure 28 : Localisation des industries susceptibles de mettre en œuvre des radionucléides	63
Figure 29 : Localisation des principales installations du site nucléaire du Tricastin	67
Figure 30 : Concentrations en uranium dans les eaux prélevées dans les piézomètres du site nucléaire retenus pour les analyses contradictoires	70
Figure 31 : Moyennes annuelles des teneurs en uranium mesurées dans le Lauzon entre 1964 et 2008 ..	72
Figure 32 : a) Représentation des concentrations en bore en fonction des concentrations en uranium sur les piézomètres du site et de la plaine - b) focus sur les données du sud du site nucléaire	74

Figure 33 : Rapports isotopiques de l'uranium en fonction des concentrations en uranium mesurées dans les eaux prélevées sur le site AREVA et dans l'environnement du site.....	75
Figure 34 : Synthèse des données acquises sur les relations nappe / rivières, la piézométrie et les zones présentant un marquage par de l'uranium.....	78
Figure 35 : Piézométrie calculée par le modèle ANTEA (lignes noires et cartouches sur fond blanc) avec report des mesures de la campagne de mars 2009	81
Figure 36 : Carte calculée par ANTEA des zones polluées pour différents scénarios d'infiltration du Grand Béal.....	82
Figure 37 : Résultats de la modélisation hydrodynamique (rouge) comparés à la piézométrie mesurée (bleue)	84
Figure 38 : Chronique des concentrations moyennes annuelles en uranium dans le Lauzon (en µg/L) et chronique simplifiée utilisée par l'IRSN pour sa modélisation.	86
Figure 39 : Modélisation d'un transfert de soluté entre La Gaffière-Lauzon et le lac Trop Long - Les concentrations calculées dans la zone verte sont comprises entre 6 et 20 µg/L (au-delà du bruit de fond).....	87

1 INTRODUCTION

En 2007, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), les Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS) de Vaucluse et de la Drôme et AREVA ont mené une étude sur la radioactivité des eaux de la nappe autour du site nucléaire du Tricastin [1]. Cette étude a consisté à effectuer une campagne de 13 prélèvements dans des puits privés situés au sud, à l'ouest et au nord du site nucléaire du Tricastin et à analyser les isotopes de l'uranium et de leurs descendants ainsi que le plutonium et l'américium. Cette étude a montré :

- qu'en un point, situé au sud du site nucléaire, les activités « alpha global » observées (0,2 Bq/L) étaient supérieures à la valeur guide fixée par l'arrêté du 12 mai 2004 (0,1 Bq/L pour l'ensemble des émetteurs alpha). Toutefois, la Dose Totale Indicative (DTI) calculée à partir des activités des principaux radionucléides émetteurs alpha mesurées en ce point, atteignait la valeur de 0,013 mSv/an, valeur faible et largement inférieure à la valeur de 0,1 mSv/an relative aux eaux destinées à la consommation humaine, fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), reprise par l'Union Européenne dans la directive 98/83/CE et transposée en droit français dans l'article R.1321-20 du code de la santé publique ;
- qu'en trois points, tous situés au sud du site nucléaire, les concentrations en uranium dans les eaux de forages dépassaient le bruit de fond¹ pour atteindre des valeurs comprises entre 4 et 10,5 µg/L ;
- qu'il n'était pas possible d'écarter une origine artificielle de ces concentrations plus élevées en uranium, constatées dans ces trois points.

Les résultats de cette étude ont été présentés lors de la réunion du 4 juillet 2008 de la Commission d'Information des Grands Equipements Energétiques du Tricastin (CIGEET).

A la suite du déversement accidentel dans l'environnement d'une solution contenant de l'uranium, survenu dans la nuit du 7 au 8 juillet 2008 dans l'usine SOCATRI (site nucléaire du Tricastin), un plan de surveillance spécifique a été mis en place afin d'apprécier la possibilité de migration de l'uranium depuis les eaux de surface (rivières et lacs) vers la nappe. Ce plan de surveillance, qui a été mis en œuvre de juillet 2008 à décembre 2009, comprenait en particulier l'analyse des teneurs en uranium d'eaux prélevées régulièrement (prélèvements journaliers à hebdomadaires) dans une trentaine de puits privés localisés au sud du site du Tricastin. L'analyse des nombreuses données de concentration en uranium ainsi obtenues n'a pas mis en évidence de relation entre l'augmentation transitoire de la teneur en uranium dans la rivière traversant le site nucléaire (La Gaffière) consécutive au rejet accidentel et la concentration en uranium dans la nappe (sauf pour un point situé à quelques mètres de la rivière). Ces investigations ont, par ailleurs, confirmé l'existence d'une variabilité spatiale de la

¹ Le bruit de fond correspond aux concentrations « usuelles » mesurées regionalement en dehors d'influences particulières. Sur la base des éléments disponibles à l'époque, une valeur de quelques microgrammes par litre était prise en référence.

teneur en uranium dans la nappe, déjà mise en évidence lors de l'étude de 2007, et ont mis en évidence, en plusieurs points, des valeurs supérieures à 10 µg/L voire supérieures à la valeur guide de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau potable (15 µg/L) [2-4]. Cette valeur guide est, par ailleurs, confirmée par l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) [5].

A la suite de l'incident SOCATRI, en réponse à une saisine du Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie Associative [6], l'IRSN a indiqué qu'il mènerait, à partir de l'automne 2008, une campagne de mesures d'uranium dans les eaux de la nappe autour du site du Tricastin en y faisant participer les associations et laboratoires environnementaux locaux qui le souhaiteraient [7]. Dans le même temps, les DDASS de Vaucluse et de la Drôme ont exprimé le souhait de pouvoir disposer d'informations complémentaires, d'une part sur la variabilité spatiale des concentrations en uranium dans l'eau de la nappe du Tricastin, d'autre part sur la variabilité temporelle des concentrations aux points présentant des concentrations « anormales ». Enfin et simultanément, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a demandé à AREVA de poursuivre de façon plus détaillée l'étude effectuée en 2007, en incluant notamment les données provenant des mesures effectuées dans le cadre du plan de surveillance [8].

En septembre 2008, l'IRSN, AREVA et les DDASS ont donc initié une deuxième étude dont l'objectif principal était d'étudier l'origine des concentrations en uranium élevées observées dans les eaux de nappe autour du site nucléaire du Tricastin. Les grandes lignes de cette deuxième étude ont été présentées par l'IRSN lors de la réunion de la CIGEET du 21 novembre 2008 et il a été proposé par les trois partenaires que soit mis en place un Groupe de Suivi² de cette étude, rassemblant des représentants des quatre collèges de la CIGEET (*Annexe 1*). Cette proposition ayant été acceptée par cette dernière, le Groupe de Suivi a été installé en février 2009 et le plan d'actions de l'étude a été présenté, discuté et amendé lors des deux premières réunions du Groupe de Suivi. Ce plan d'action est présenté en *Annexe 2*. Entre février 2008 et mai 2010, le Groupe de Suivi s'est réuni 8 fois [9-14] afin de suivre et d'orienter les travaux menés par AREVA, l'IRSN et les DDASS. L'avancée des travaux a par ailleurs été présentée dans le cadre des réunions de la Commission Locale d'Information des Grands Equipements Energétiques du Tricastin (CLIGEET, anciennement CIGEET) en juillet et novembre 2009.

L'objet du présent rapport est de présenter les résultats de cette étude qui a comportée deux phases :

- une première phase qui s'est attachée, d'une part à mieux connaître le fonctionnement de la nappe alluviale du Tricastin, d'autre part à obtenir une cartographie de la teneur en uranium de la nappe autour du site nucléaire du Tricastin ;

² Le groupe de suivi comprend des représentants d'AREVA, de l'IRSN, des DDASS de la Drôme et de Vaucluse, de l'InVS, d'EDF, de la CFDT, de la FRAPNA, de l'ASN, de l'ASND et du LDA26. La CRIIRAD considérait que les investigations devaient être conduites par des organismes dont la responsabilité (dans l'éventuelle pollution ou dans le défaut de surveillance de l'environnement) n'était pas susceptible d'être mise en cause. Elle n'a donc pas souhaité intégrer le groupe de travail mais a sollicité et obtenu l'autorisation d'assister aux réunions.

- une seconde qui, sur la base des résultats obtenus dans la première phase, s'est attachée à tester trois hypothèses possibles quant à l'origine des concentrations les plus élevées en uranium observées dans l'eau de nappe de la plaine du Tricastin : 1) l'hypothèse d'une origine en relation avec la géologie locale, 2) l'hypothèse d'une origine anthropique autre que celle liée au site nucléaire, 3) l'hypothèse d'une origine liée au site nucléaire.

La méthode qui a été utilisée pour rédiger ce rapport est la suivante. Les chapitres 1 à 3 ont été rédigés, dans un premier temps, par l'IRSN et traduisent donc la position de cet institut, en particulier en ce qui concerne la validité des différentes hypothèses examinées. Ce document a été ensuite soumis à l'ensemble des membres du Groupe de Suivi, qui ont fait leurs commentaires et remarques dans un chapitre dédié (Chapitre 4). Enfin, l'IRSN a rédigé une conclusion finale synthétisant les résultats des deux phases de l'étude et les différents points de vue exprimés par les membres du Groupe de Suivi.

2 CARACTERISATION DU SECTEUR D'ETUDE ET DU MARQUAGE DE LA NAPPE PAR L'URANIUM

2.1 ZONE D'ETUDE

L'emprise géographique de l'étude (Figure 1 et 2) a porté sur un secteur délimité à l'est par le Canal de Donzère-Mondragon et à l'ouest par le Rhône, soit environ 200 km² (26 km du Nord au Sud et 8 km d'Est en Ouest). Cette surface intéresse 10 communes réparties sur deux départements (Drôme, Vaucluse) et appartenant à deux régions distinctes (Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Ces 10 communes sont les suivantes :

- Bollène ;
- Donzère
- La-Garde-Adhémar ;
- Lamotte-du-Rhône
- Lapalud ;
- Les Granges-Gontardes ;
- Mondragon ;
- Pierrelatte ;
- Saint-Paul-Trois-Châteaux
- Saint-Restitut.

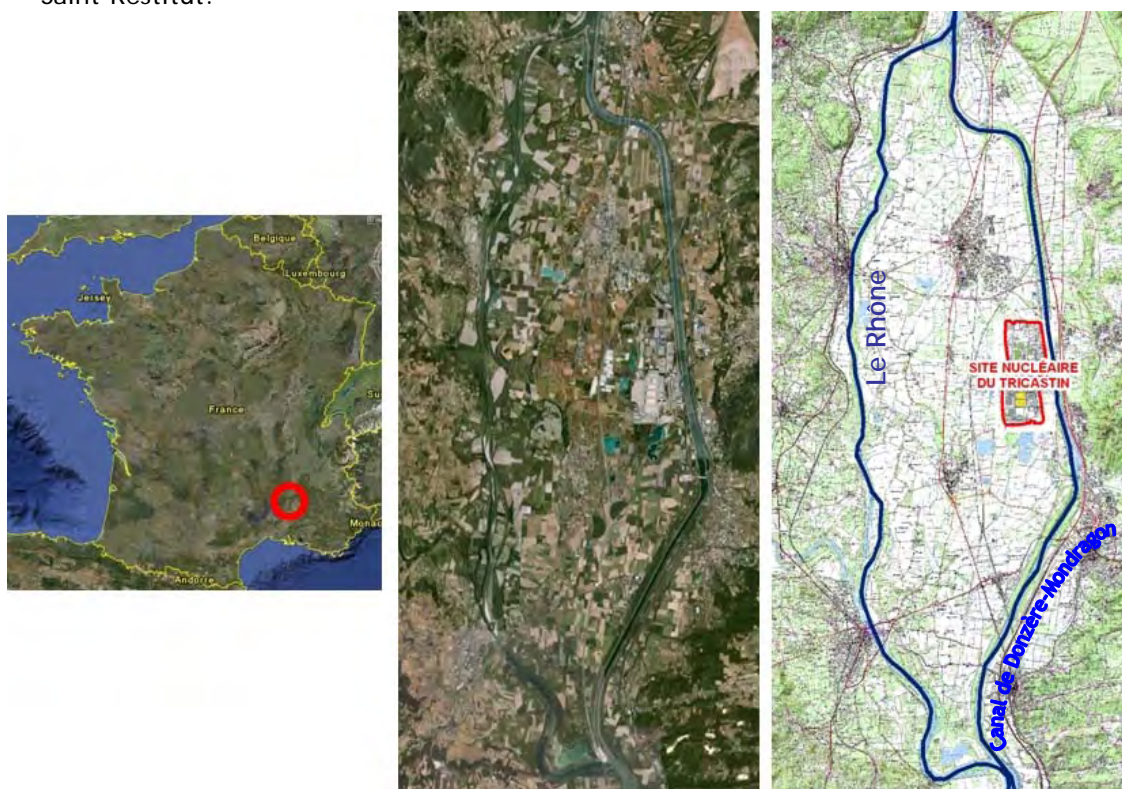


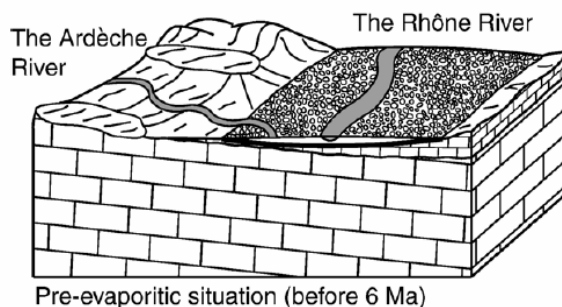
Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude

2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL

Entre Donzère au nord et Mondragon au sud (Figure 2), le Rhône et le canal de Donzère-Mondragon coulent dans une vaste plaine alluviale séparant les collines et les monts du Massif Central à l'ouest et les chaînons subalpins à l'est. La plaine présente une pente légère comprise entre 61 m NGF (au nord) et 38 m NGF (au sud). L'altitude du terrain naturel au droit du site nucléaire du Tricastin s'étage entre 48 et 51 m NGF.

En réponse à la baisse du niveau marin dans la Méditerranée, provoquée par la fermeture du détroit de Gibraltar empêchant les échanges marins avec l'Océan Atlantique à l'époque du Messinien (-5 millions d'années), une paléovallée de plusieurs centaines de mètres de profondeur s'est creusée. Cette paléovallée fluviale a été ennoyée subitement au Pliocène (-5 à -2 millions d'années) lors de la réouverture du détroit de Gibraltar (ria). La mer s'est alors avancée en couvrant l'axe rhodanien et un certain nombre de golfes latéraux. Les dépôts pliocènes sont, du haut vers le bas, d'abord continentaux (sables et conglomérats) puis saumâtre (argiles, sables argileux) avant de devenir totalement marins et à dominante argileuse. Les importances relatives de ces différents ensembles évoluent le long de la vallée du Rhône.

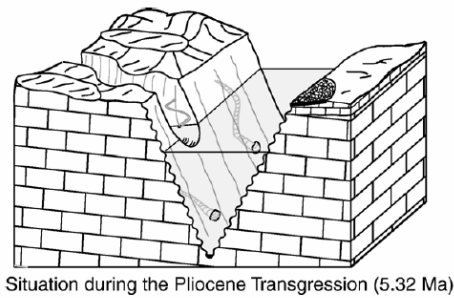
Les schémas présentés (Figure 3) issus de [15] reprennent en détail les différentes étapes de création et de comblement de la ria.



a) Représentation du secteur d'étude avant la fermeture du détroit de Gibraltar.

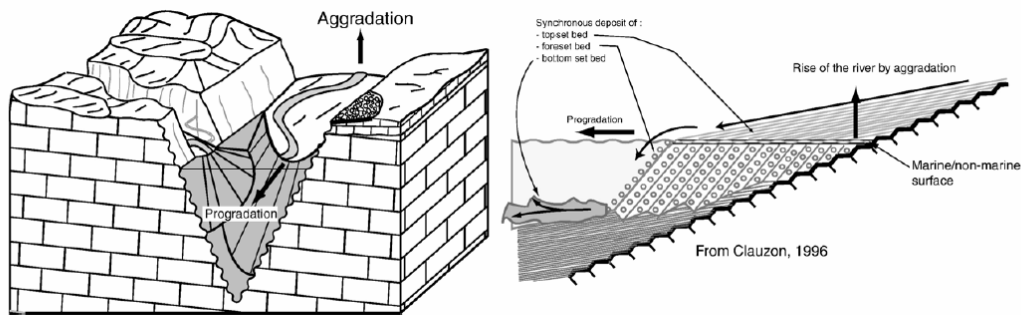


b) Au Messinien, le faible niveau de la Méditerranée entraîne un creusement important de la vallée du Rhône.



Situation during the Pliocene Transgression (5.32 Ma)

c) Au Pliocène, la brusque remontée du niveau marin entraîne l'envoyage de la ria.



d) Comblement de la ria par des sédiments argileux (marnes)

Figure 3 a,b,c et d : Schéma de la formation du canyon messinien dans la vallée du Rhône et de son remplissage par les marnes du Pliocène

Les principales formations géologiques qui affleurent régionalement sont représentées sur la carte géologique de la Figure 4 et de manière plus détaillée dans l'*Annexe 3*. Une coupe lithostratigraphique synthétique des formations observées régionalement est présentée sur la Figure 5.

Les principales formations géologiques sont, des plus récentes au plus anciennes (du haut vers le bas) :

- les formations du Quaternaire, composées essentiellement de limons et d'alluvions, couvrant la plaine de Pierrelatte-Tricastin et le fond des vallées secondaires de la rive gauche qui débouchent dans la plaine (vallées du Lez et de la Berre : cf. *Annexe 3*). Elles constituent les terrasses emboîtées du Rhône et de ses affluents. Les limons, formation quaternaire superficielle, sont constitués de dépôts meubles argileux à sablo-argileux dont la puissance varie de 0,5 à 10 mètres. Ces terrains sont peu perméables. Sous ces limons, les alluvions sablo-graveleuses, sont constituées par des mélanges de galets, de cailloutis et de sables. Les niveaux les plus profonds sont plus sableux. Toutefois, du point de vue de l'hydrogéologie, les alluvions peuvent être considérées comme homogènes. L'épaisseur de ces alluvions varie entre 5 et 20 mètres ;
- les formations du Plaisancien (étage du Pliocène, fin de l'ère Tertiaire), recouvertes dans la plaine par les alluvions du Quaternaire, affleurant localement en bordure de la plaine et des vallées secondaires. Ces formations sont constituées de marnes gris bleues typiques des dépôts de comblement de la ria. Ces matériaux présentent une faible perméabilité. L'épaisseur de

cette formation est directement dépendante de sa localisation par rapport à l'axe de la ria et peut atteindre plus de 200 mètres d'épaisseur (Figure 5). **Les marnes du Pliocène constituent le substratum imperméable des alluvions ;**

- les formations plus anciennes du Tertiaire masquées dans la plaine et affleurant dans les chaînons sub-alpins, à l'est du secteur (en jaune et en rose sur la Figure 4). Il s'agit des étages Paléogène et Néogène représentés sur la Figure 5. Ces formations sont constituées de sables, de grès, de calcaires et de marnes ;
- les formations du Crétacé supérieur et du Crétacé moyen (ère secondaire) constituant l'essentiel des reliefs dominant la plaine (affleurements en vert sur la Figure 4). Dans la plaine, elles sont rencontrées à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Cependant, par le jeu de la tectonique ou de l'érosion (création de la ria), des formations calcaires affleurent au droit de Pierrelatte (rocher de Pierrelatte) ou sur la commune de Mondragon (à l'est du canal de Donzère-Mondragon). **De plus, la présence de ces formations du crétacé, directement au contact des alluvions, est supposée dans la partie sud-ouest du secteur d'étude, sur les communes de Lapalud et de Lamotte-du-Rhône.** Cette présence est localement confirmée par des sondages réalisés en 1969 [16]. Ces formations sont constituées principalement de grès et de calcaires pouvant présenter des perméabilités élevées. La Figure 5 détaille les épaisseurs de ces formations (Cénomaniens, Turonien, Coniacien et Santonien).

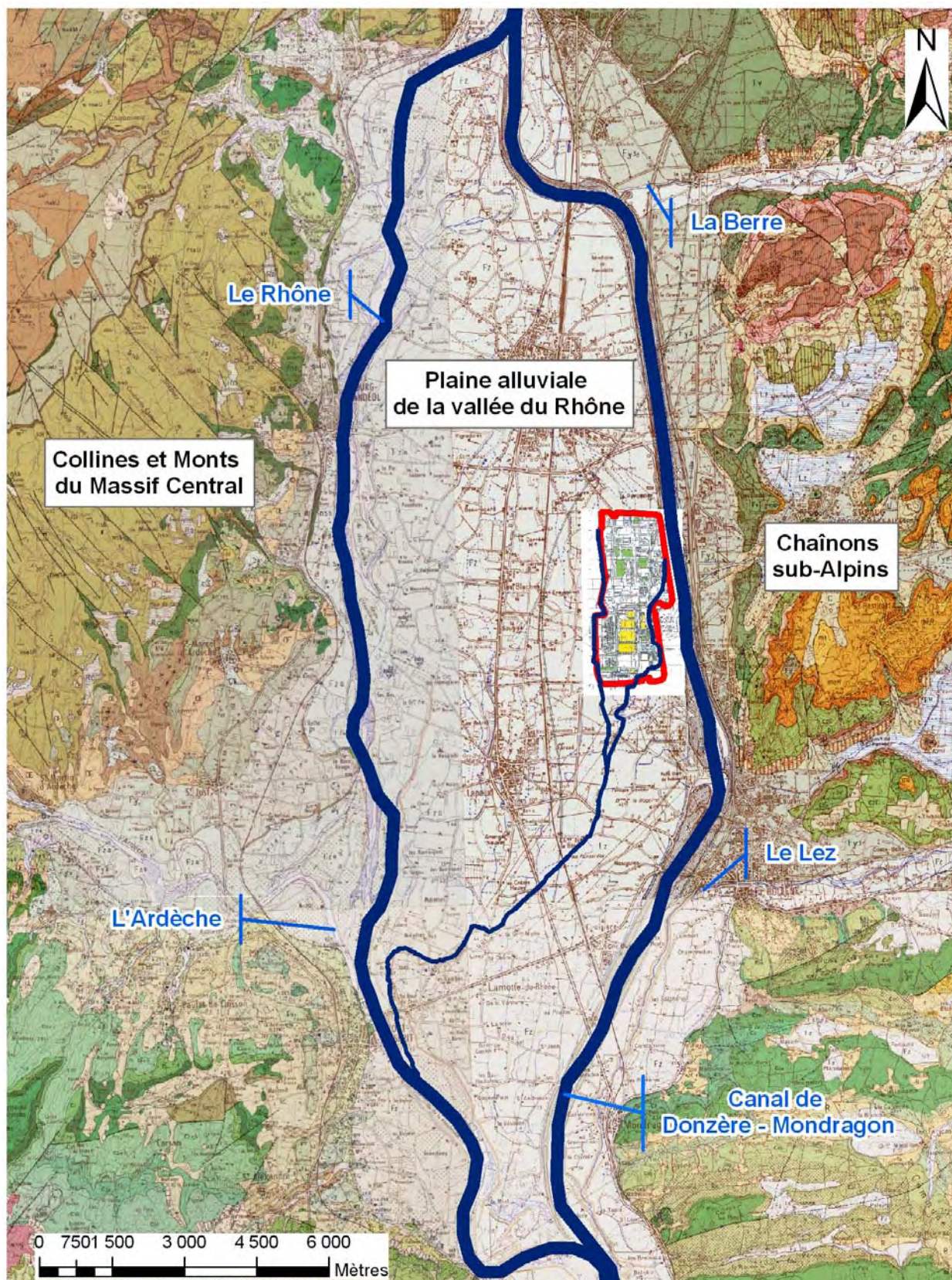


Figure 4 : Carte géologique du secteur d'étude et des massifs environnants. La légende des formations géologiques représentées sur cette carte est disponible en Annexe 2

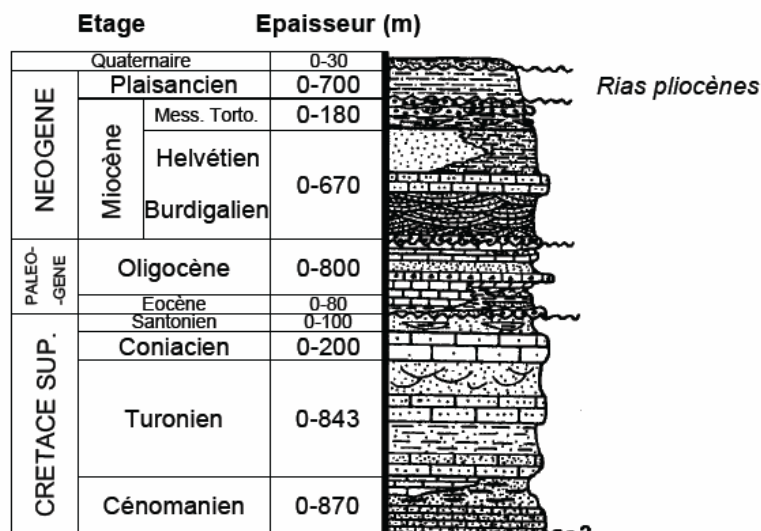


Figure 5 : coupe litho-stratigraphique régionale d'après [17]

Les alluvions du Quaternaire présentent une perméabilité relativement élevée et reposent sur un substratum imperméable. Elles constituent un aquifère, c'est-à-dire une formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et capable de la restituer naturellement ou par exploitation. L'eau circulant dans ces terrains constitue la nappe alluviale de la plaine du Tricastin, objet de l'étude.

2.3 DESCRIPTION DE L'HYDROLOGIE

Le comportement de la nappe, comme par exemple la variation de son niveau, est très lié aux cours d'eau naturels ou artificiels. Le Rhône et le canal de Donzère-Mondragon constituent les cours d'eau les plus importants de la plaine. Cependant, celle-ci est parcourue par un réseau de cours d'eau plus petits qui sont également en relation avec la nappe. L'étude a porté en particulier sur le Lauzon, la Gaffière, la Mayre Girarde, le grand et le petit Béal. L'ensemble de ces cours d'eau est présenté sur la Figure 6.

La nappe est également en relation avec plusieurs plans d'eau qui apparaissent sur la Figure 6. Ils sont le résultat des exploitations de granulats. Les gravières se sont remplies d'eau pendant et après l'exploitation. Les relations entre la nappe et les plans d'eau sont présentées au paragraphe 3.3.4.

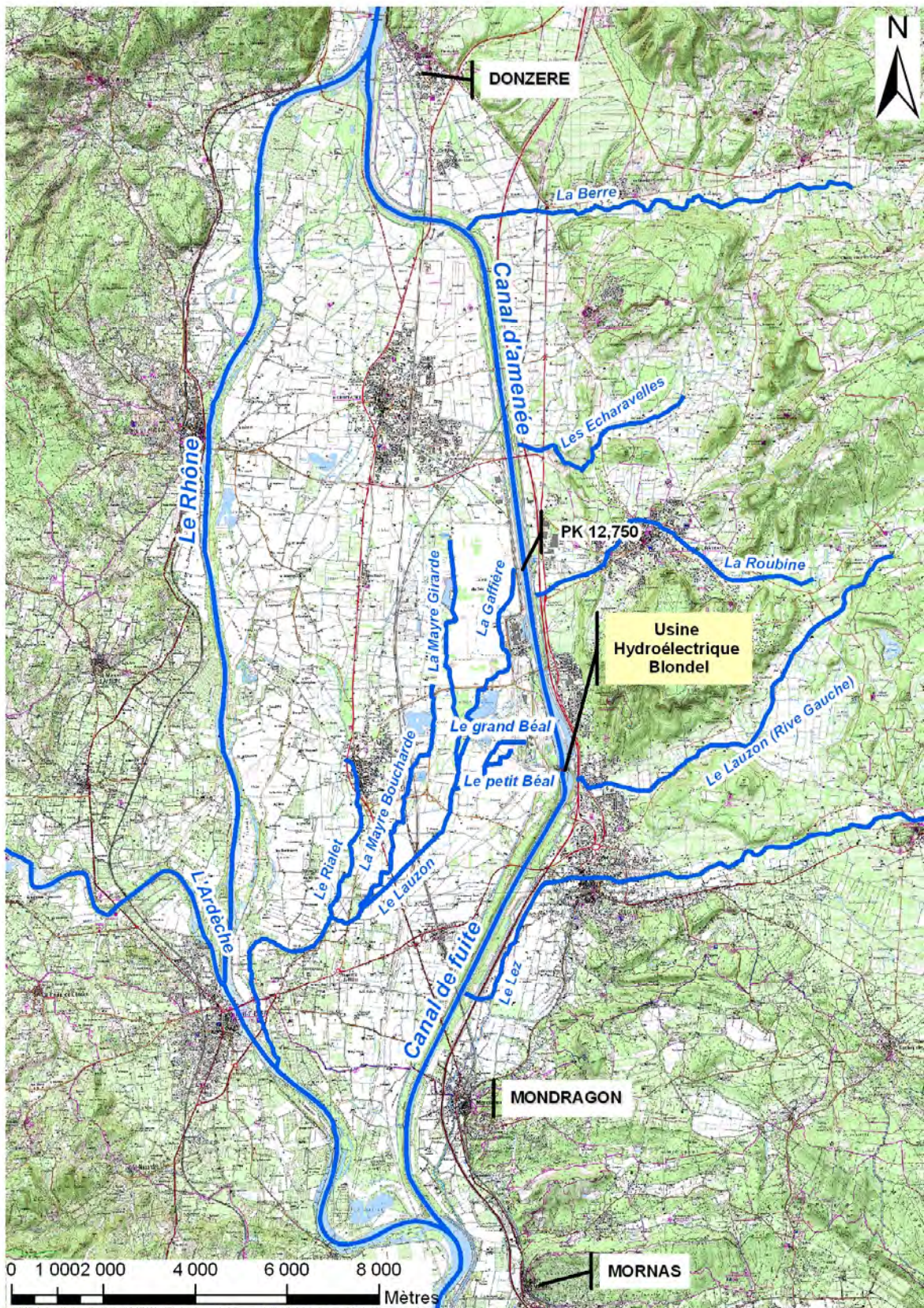


Figure 6 : Localisation des principaux cours d'eau et du réseau hydrographique secondaire (2009)

2.3.1 LE RHONE

Le Rhône s'écoule du nord vers le sud en bordure ouest du secteur d'étude. Il présente un débit moyen de 1700 m³/s (mesuré à la station de Beaucaire localisée entre Avignon et Arles). Son régime d'écoulement est de type mixte pluvio-nival avec de forts débits en mai, juin, juillet et pendant la saison froide. La ligne d'eau du Rhône est comprise en moyenne entre 58,5 m NGF au niveau de l'entrée du canal de Donzère-Mondragon et 34 m NGF au niveau de sa confluence avec le canal de fuite de Donzère-Mondragon à Mornas. **A l'exception des périodes de crues, le Rhône draine les eaux de la nappe des alluvions.** La concentration moyenne du Rhône en uranium est de 0,5 µg/L (données issues du Bilan radiologique de l'environnement réalisé par l'IRSN en 2009). La masse d'uranium transitant chaque jour dans le Rhône peut ainsi être estimée à environ 80 kg.

2.3.2 LE CANAL DE DONZERE-MONDRAGON

Le canal de Donzère-Mondragon, construit par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) à partir de 1947 et mis en service en 1952, est localisé en bordure est de la plaine du Tricastin (Figure 6). L'eau s'écoule du barrage de retenue de Donzère (Nord) vers le verrou de Mornas (confluence avec le Rhône au Sud). **Le canal de Donzère-Mondragon est composé d'un canal d'aménée de 18 km jusqu'à l'usine hydroélectrique (usine Blondel) utilisant une chute d'environ 23 mètres et d'un canal de fuite de 10 km.** Le régime d'écoulement du canal de dérivation est conditionné par celui du Rhône et présente un débit moyen d'environ 1230 m³/s. La concentration moyenne en uranium des eaux du canal de Donzère-Mondragon est similaire à celle des eaux du Rhône.

2.3.2.1 Canal d'améné

En amont de l'usine hydroélectrique Blondel (Figure 6), le canal d'aménée permet de maintenir un niveau d'eau stable proche de 58,5 m NGF. **Des digues ont été élevées le long du canal pour maintenir la ligne d'eau au-dessus de la cote du terrain naturel.** Ces digues, constituées à partir des matériaux en place (limons et alluvions) laissent circuler un volume d'eau conséquent. **Le canal d'aménée alimente la nappe alluviale.** Des dispositifs de collecte des fuites, constitués par des contre-canaux disposés de part et d'autre du canal, ont été mis en place par la CNR. Un schéma reprenant le principe de fonctionnement du canal d'aménée et des contre-canaux est présenté sur la Figure 7. Le contre-canal rive gauche (CCRG) collecte également des écoulements en provenance de l'est (nappe et cours d'eau tels que les Echaravelles et La Roubine). L'eau collectée est transférée en rive droite par des siphons qui permettent de traverser le canal de dérivation. Les eaux sont ensuite réparties entre le contre-canal rive droite (CCRD) et la Gaffière (Figure 6). Les eaux en provenance de La Berre se déversent dans le canal d'aménée.

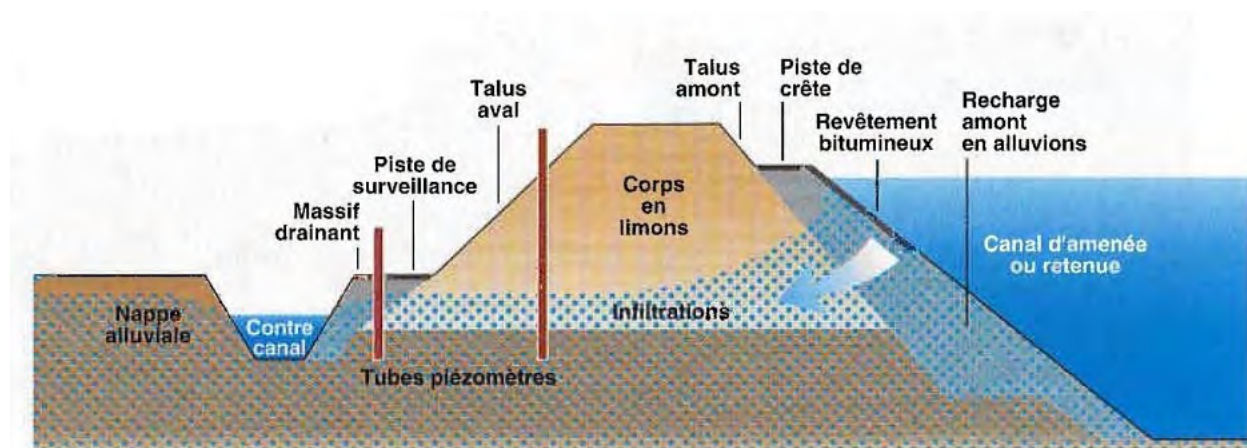


Figure 7 : Schéma de principe des écoulements dans les digues et des collectes par les contre-canaux

2.3.2.2 Canal de fuite

En aval de l'usine hydroélectrique Blondel, le niveau d'eau dans le canal de fuite est compris en moyenne entre 36 m NGF (au pied de l'usine) et 34 m NGF à sa confluence avec le Rhône (Figure 6). Le canal a été profondément creusé dans les argiles pliocènes sous-jacentes pour assurer sa communication avec le Rhône. Sa ligne d'eau est située en dessous de la cote du terrain naturel. De par cette position, le canal de fuite constitue un axe de drainage des eaux de la nappe du Tricastin (Figure 8). Pour remédier à l'abaissement du niveau de la nappe dû au canal de fuite, des systèmes de ré-infiltration d'eau ont été mis en place de part et d'autre du canal de fuite (canaux de réalimentation, forages et puits d'infiltration) afin de maintenir un niveau minimum de la nappe. Une carte de localisation des puits d'infiltration est présentée sur la Figure 9 et un schéma de principe de ces ouvrages est présenté sur la Figure 10. Il est à noter que les puits ont des dimensions relativement importantes, de l'ordre de 30 mètres de long pour 22 mètres de large et présentent des profondeurs variant de 14 à 20 mètres. Un niveau d'eau constant dans ces ouvrages (puits et forages d'infiltration) est maintenu afin d'assurer une réalimentation régulière de la nappe des alluvions. L'âge de ces puits et l'absence de tests d'infiltration ne permettent pas de définir les capacités réelles de ce système.



Figure 8 : Schéma de principe des écoulements au voisinage du canal de fuite - influence du canal de réalimentation (contre-canal)

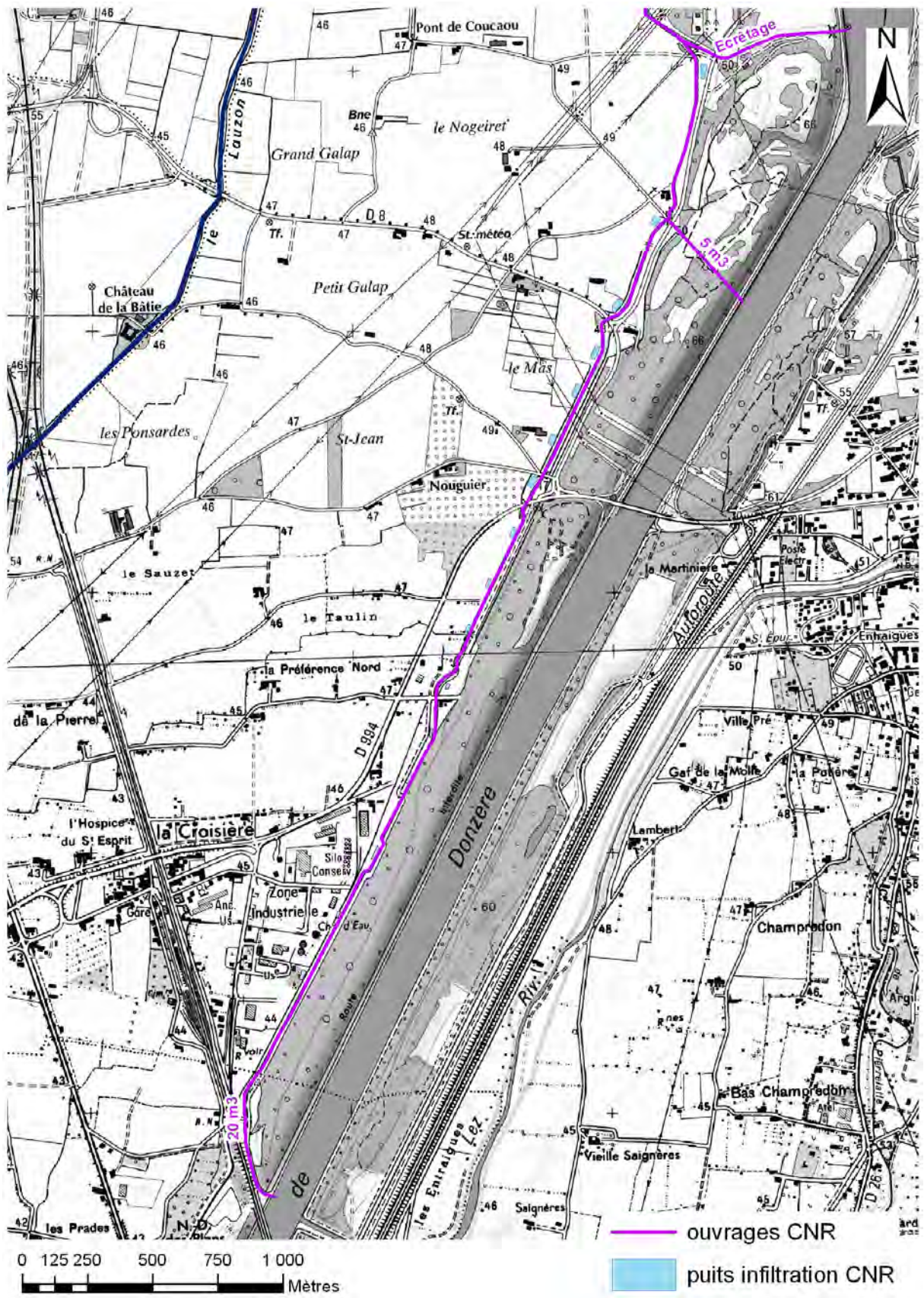
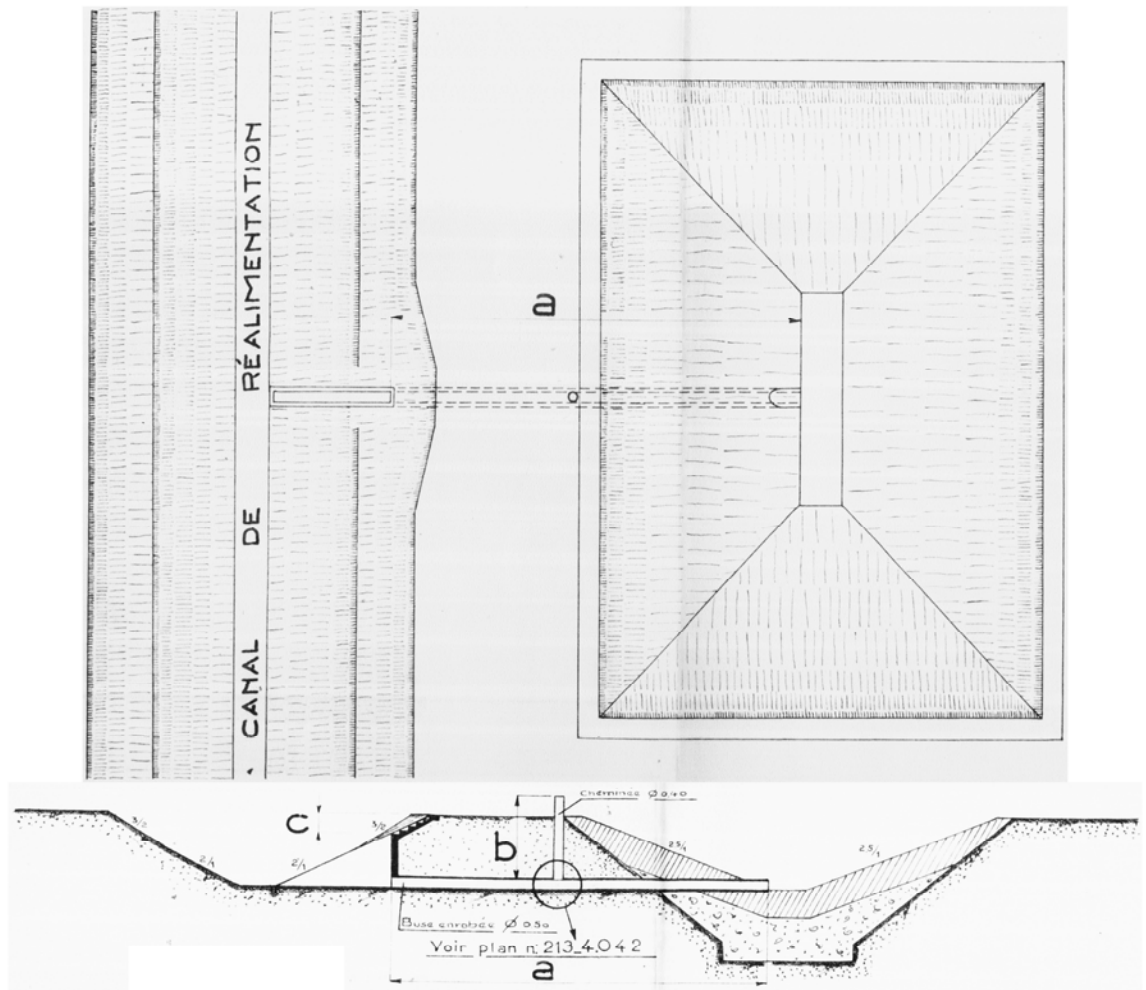
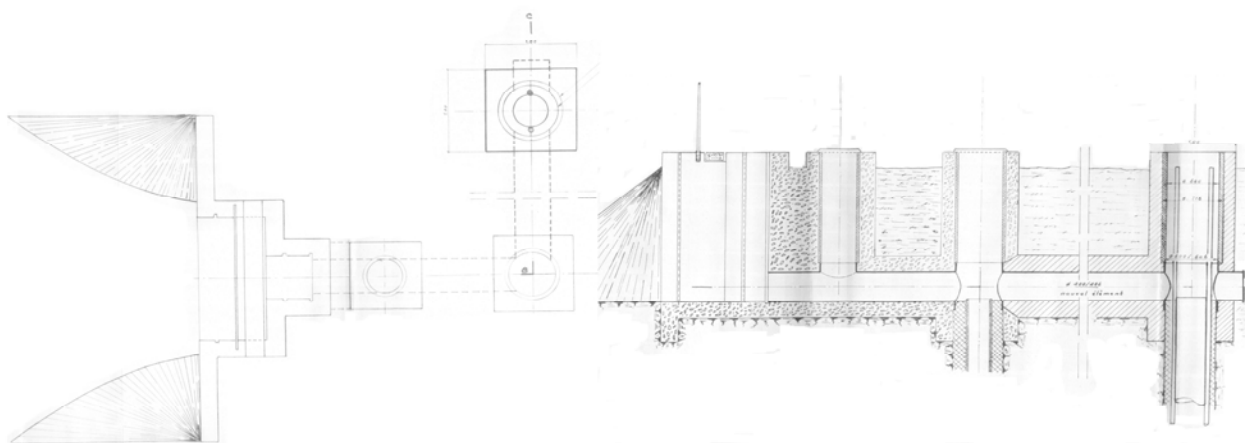


Figure 9 : Localisation des puits d'infiltration de la CNR pour soutenir la nappe des alluvions



Puits d'infiltration : vue de plan (en haut) ; vue de coupe (en bas)



Forage d'infiltration : vue de plan (gauche) ; vue de coupe (droite)

Figure 10 : Plan des puits d'infiltration et des prises d'eau dans le canal de réalimentation

2.3.3 LES COURS D'EAU DE LA PLAINE

La plaine est parcourue par de nombreux cours d'eau souvent aménagés pour l'irrigation. L'étude s'est intéressée en particulier à la Gaffière qui traverse le site nucléaire et à ses affluents.

2.3.3.1 La Gaffière - Le Lauzon

La Gaffière est un canal réalisé par la CNR pour évacuer une partie des eaux en provenance des contre-canaux. La Gaffière prend son origine dans le contre-canal rive gauche, au niveau du siphon du PK 12,750 (Figure 6) du canal de dérivation de Donzère-Mondragon. La Gaffière traverse le site nucléaire et son cours a été aménagé lors de l'installation du site nucléaire, au cours des années 60. Elle s'écoule ensuite sur quelques kilomètres avant de rejoindre la Mayre Girarde. A partir de cette confluence, le cours d'eau formé prend le nom de Lauzon.

Le Lauzon est un cours d'eau naturel qui existait avant les aménagements du canal de Donzère-Mondragon. Il prend sa source dans l'arrière pays des collines du Tricastin et du massif d'Uchaux à l'est de la plaine. Il traversait la plaine du Tricastin pour se jeter dans le Rhône au sud de Pont St-Esprit. La création du canal de dérivation a eu pour conséquence de couper le lit du Lauzon qui se déverse actuellement dans le canal de fuite. En rive droite, La Gaffière permet d'alimenter l'ancien cours du Lauzon.

2.3.3.2 La Mayre Girarde

La Mayre Girarde s'écoule du nord vers le sud en bordure Ouest du site nucléaire du Tricastin. Elle rejoint ensuite La Gaffière à 2 km au sud du site nucléaire pour former le Lauzon.

L'alimentation de ce cours d'eau est essentiellement assurée par les rejets des pompages en nappe provenant d'une pisciculture située au nord-ouest du site nucléaire, d'un débit de l'ordre de 1000 m³/h, et par la collecte des eaux de ruissellement.

2.3.3.3 Le Grand Béal - Le Petit Béal

Le Grand et le Petit Béal sont deux cours d'eau localisés immédiatement au sud du site nucléaire du Tricastin et qui se jettent dans le Lauzon au sud de la confluence Gaffière-Mayre Girarde. Ces deux cours d'eau sont alimentés par des prises d'eau dans le CCRD. Leurs mises en place datent de la réalisation du canal de Donzère-Mondragon ; ils permettent de maintenir le niveau de la nappe pour assurer l'alimentation en eau nécessaire à l'irrigation.

2.4 DESCRIPTION DE L'HYDROGEOLOGIE DE LA PLAINE

Dans le secteur d'étude, trois formations géologiques peuvent être aquifères, c'est-à-dire susceptibles de contenir une nappe d'eau souterraine : les limons, les alluvions et les calcaires. Les écoulements dans ces formations sont plus ou moins importants en fonction de l'épaisseur des terrains aquifères et

de leur perméabilité. Les informations présentées ci-après sont issues essentiellement d'une étude réalisée par ANTEA, à la demande d'AREVA [18].

2.4.1 NAPPE DES LIMONS

Plusieurs ouvrages (puits, piézomètres) répartis dans la plaine du Tricastin mettent en évidence la présence d'une nappe superficielle dans les limons, d'extension géographique limitée. Ces formations présentent des valeurs de perméabilité faibles, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} m/s, pour les limons à dominante sableuse et de l'ordre de 10^{-9} m/s pour les limons à dominante argileuse. **Les niveaux d'eau qui ont pu être mesurés dans ces formations montrent que la nappe des limons alimente les alluvions sous-jacentes lorsque les limons superficiels sont à saturation. La faible productivité de la nappe et son caractère discontinu ne permettent pas son exploitation.**

2.4.2 NAPPE DES ALLUVIONS

Les alluvions sablo-graveleuses reposent sur les marnes du Pliocène qui constituent un substratum imperméable permettant l'accumulation d'eau dans ces formations, les rendant aquifères. Cet aquifère présente une extension géographique importante.

La nappe des alluvions est la principale ressource en eau du secteur d'étude, pour l'irrigation et l'alimentation en eau de particuliers. En effet, elle est facilement accessible par des forages, avec un niveau d'eau moyen à 2 mètres sous la surface du sol. De plus, les alluvions ont une perméabilité élevée (10^{-3} m/s) qui permet un renouvellement facile de l'eau. L'épaisseur des alluvions est comprise entre 5 et 20 mètres et peut atteindre 30 mètres au nord de la plaine, à proximité de Donzère. En moyenne, l'épaisseur est de l'ordre de 10 mètres.

Jusqu'en 1947, date de création du canal de Donzère-Mondragon, la nappe des alluvions s'écoulait du nord-est vers le sud-ouest et présentait le comportement classique d'une nappe d'accompagnement³. La nappe, alimentée par les collines du Tricastin à l'Est et les précipitations, était drainée par le Rhône en limite ouest de la plaine.

Comme indiqué au § 2.3.2, l'aménagement du canal de Donzère-Mondragon a fortement modifié les écoulements de la nappe des alluvions. Une campagne de mesures du niveau de la nappe (mesures piézométriques) a été réalisée en mars 2009 par ANTEA pour le compte d'AREVA sur 105 points de mesures. A partir de ces mesures, il est possible de tracer une carte piézométrique de la nappe alluviale du Tricastin qui représente, à une date donnée, la « topographie » de la surface supérieure de la nappe. Une carte piézométrique est établie en suivant la même méthode que pour une carte

³ Désigne une nappe souterraine en forte liaison hydraulique avec un cours d'eau permanent (Le Rhône, dans le cas présent).

topographique. L'ensemble des mesures d'altitude (du sol ou ici du niveau d'eau) est utilisé pour tracer des courbes de niveaux constants (courbes topographiques ou ici isopièzes). L'écoulement de l'eau de la nappe s'effectue perpendiculairement aux isopièzes, suivant la ligne de plus grande pente. Des schémas synthétiques des diverses configurations d'écoulement sont présentés sur la Figure 11.

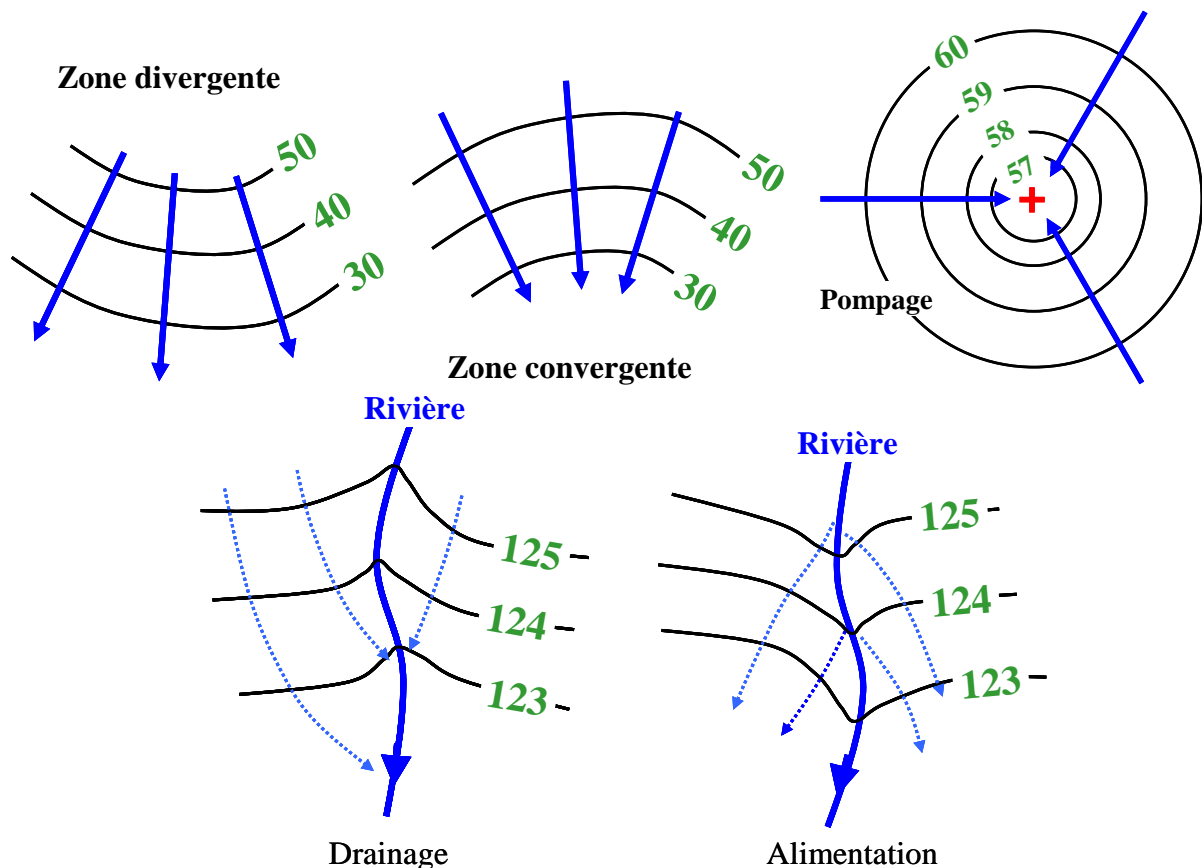


Figure 11 : Schéma de diverses configurations d'écoulements - Les lignes noires représentent les isopièzes - Les lignes bleues définissent le sens d'écoulement de la nappe

La carte piézométrique résultant de ces mesures est visible sur la Figure 13, pour l'ensemble du secteur d'étude. La Figure 14 est un agrandissement du site nucléaire du Tricastin. L'analyse de ces cartes piézométriques met en évidence deux parties dans la plaine.

Partie nord de la plaine du Tricastin (en amont de l'usine hydroélectrique Blondel)

L'aménagement du canal d'aménée a contribué à rehausser le niveau de la nappe. Dans la partie la plus septentrionale, la nappe s'écoule d'est en ouest, suivant une direction à peu près perpendiculaire au canal de Donzère-Mondragon et au Rhône. Plus au sud, l'écoulement de la nappe s'infléchit nettement vers le sud. Dans l'angle nord-ouest du site nucléaire (Figure 14), le pompage quasi-permanent de la pisciculture d'un débit d'environ 1000 m³/h crée une dépression

inversant localement les directions d'écoulement. La forte productivité de la nappe limite la distance d'impact de ce pompage.

Partie sud de la plaine du Tricastin (en aval de l'usine hydroélectrique)

L'écoulement présente encore une forte composante du nord vers le sud. Cependant, l'influence du canal de fuite est importante et crée un abaissement du toit de la nappe que les systèmes d'injection de la CNR ne permettent pas de compenser complètement. **Entre le Lauzon et le canal de fuite, la nappe est drainée vers le canal de fuite. Entre le Lauzon et le Rhône la nappe est le plus souvent drainée vers le sud-ouest en direction du Rhône.** Cette configuration, dans laquelle le Lauzon constitue l'origine des directions d'écoulement, met en évidence une alimentation de la nappe par le Lauzon. Elle est bien mise en évidence sur quelques kilomètres en aval de la confluence de la Mayre Girarde avec la Gaffière. **Dans l'extrême sud de la plaine du Tricastin, le drainage de la nappe par le canal de fuite devient prépondérant sur le drainage par le Rhône.**

Au droit du site nucléaire, l'écoulement de la nappe est influencé par plusieurs aménagements. La construction de certains bâtiments a nécessité la mise en œuvre de voiles étanches (parois moulées). Ces enceintes ont pour effet de dévier les écoulements. La localisation de ces voiles étanches est présentée sur la Figure 14. Il s'agit, du nord vers le sud :

- d'un voile construit sous l'atelier TU5 pour confiner le sous-sol de l'installation,
- d'une enceinte autour de l'usine EURODIF et des aéro-réfrigérants,
- d'un voile étanche qui ceinture une partie des installations de l'usine SOCATRI,
- d'une enceinte autour des installations de la centrale d'EDF.

Les prélèvements en nappe réalisés sur le site nucléaire ont également une influence sur la piézométrie locale. Les pompages mis en place au droit des usines EURODIF (30 m³/h) pour l'alimentation en eau potable et SOCATRI (140 m³/h) pour constituer une barrière hydraulique, génèrent des dépressions piézométriques de moindre importance.

Au droit du site, le toit de la nappe se trouve en moyenne entre 49,5 m NGF au nord-est et 45,5 m NGF au sud. L'eau s'écoule globalement du nord vers le sud avec cependant la présence d'une ligne de partage des eaux selon un axe nord-est / sud-ouest correspondant à la limite d'influence du pompage de la pisciculture. Le rétrécissement créé par les parois moulées d'EURODIF (à l'ouest) d'une part, le CCRD (à l'est) d'autre part, génère une remontée artificielle du niveau de la nappe dans ce secteur se traduisant par un drainage accru de la nappe par la Gaffière.

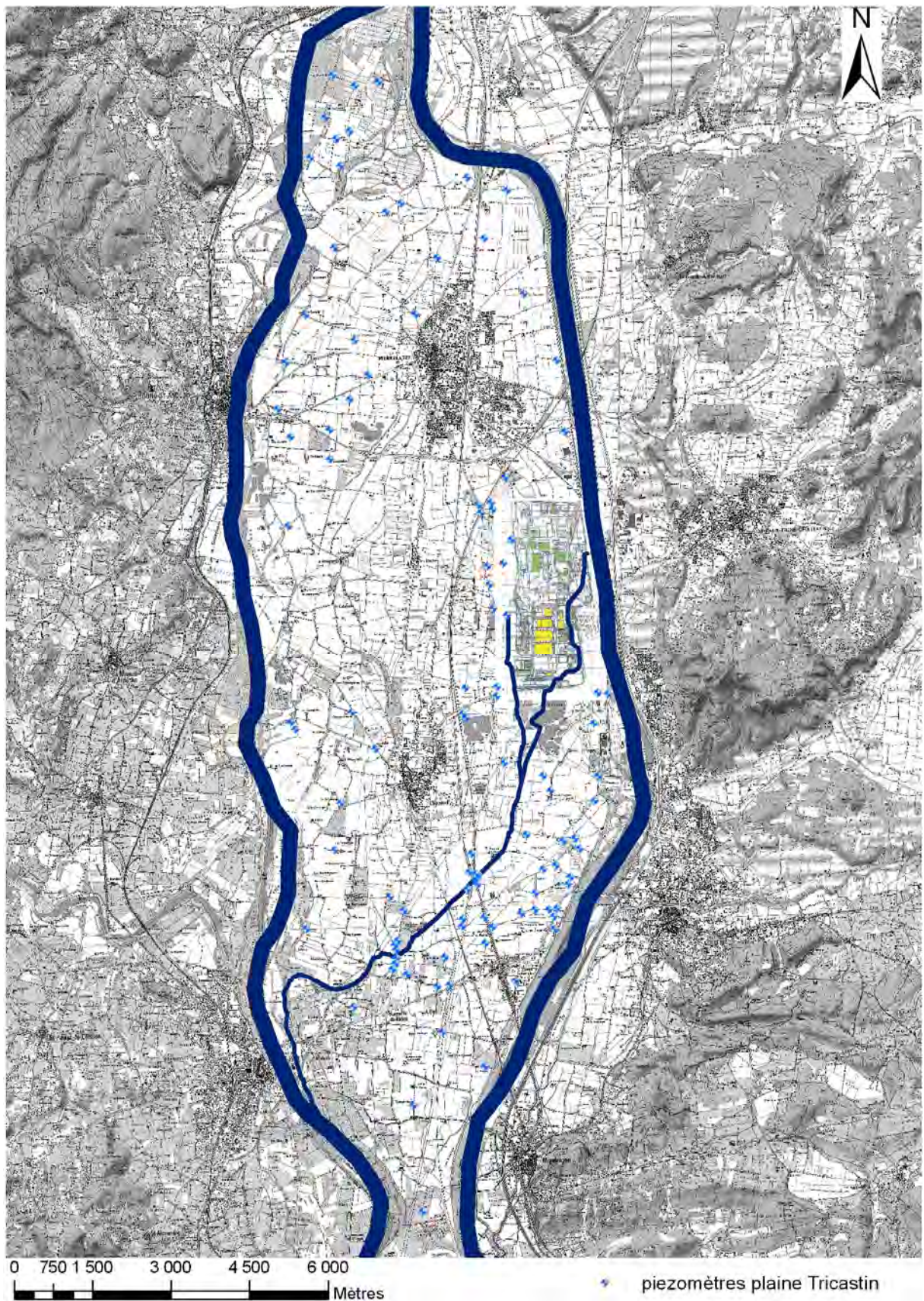


Figure 12 : Localisation des piézomètres dans la plaine du Tricastin (mars 2009)

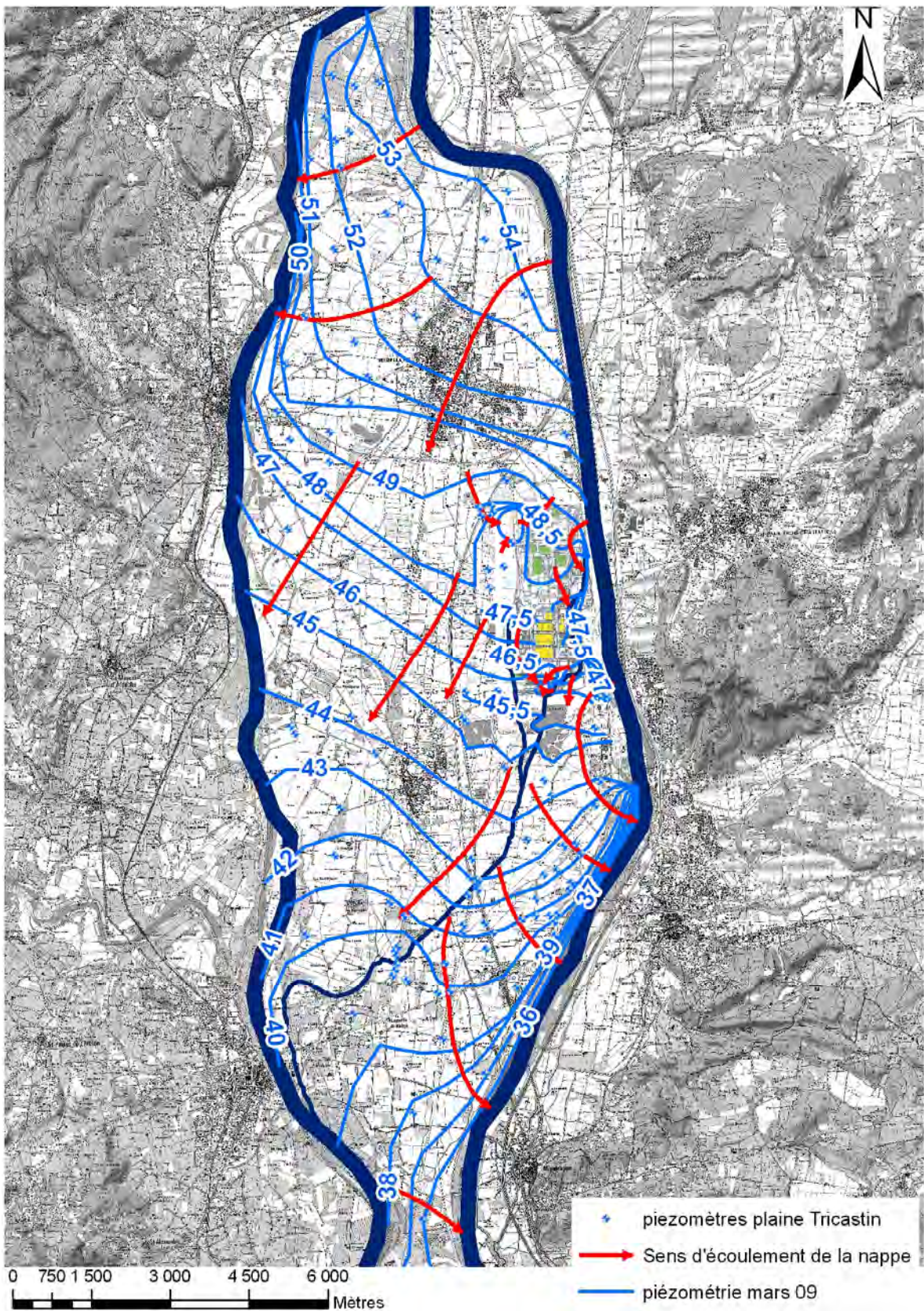


Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe des alluvions dans la plaine du Tricastin (mars 2009) -
Interprétation IRSN de la carte tirée de [19]

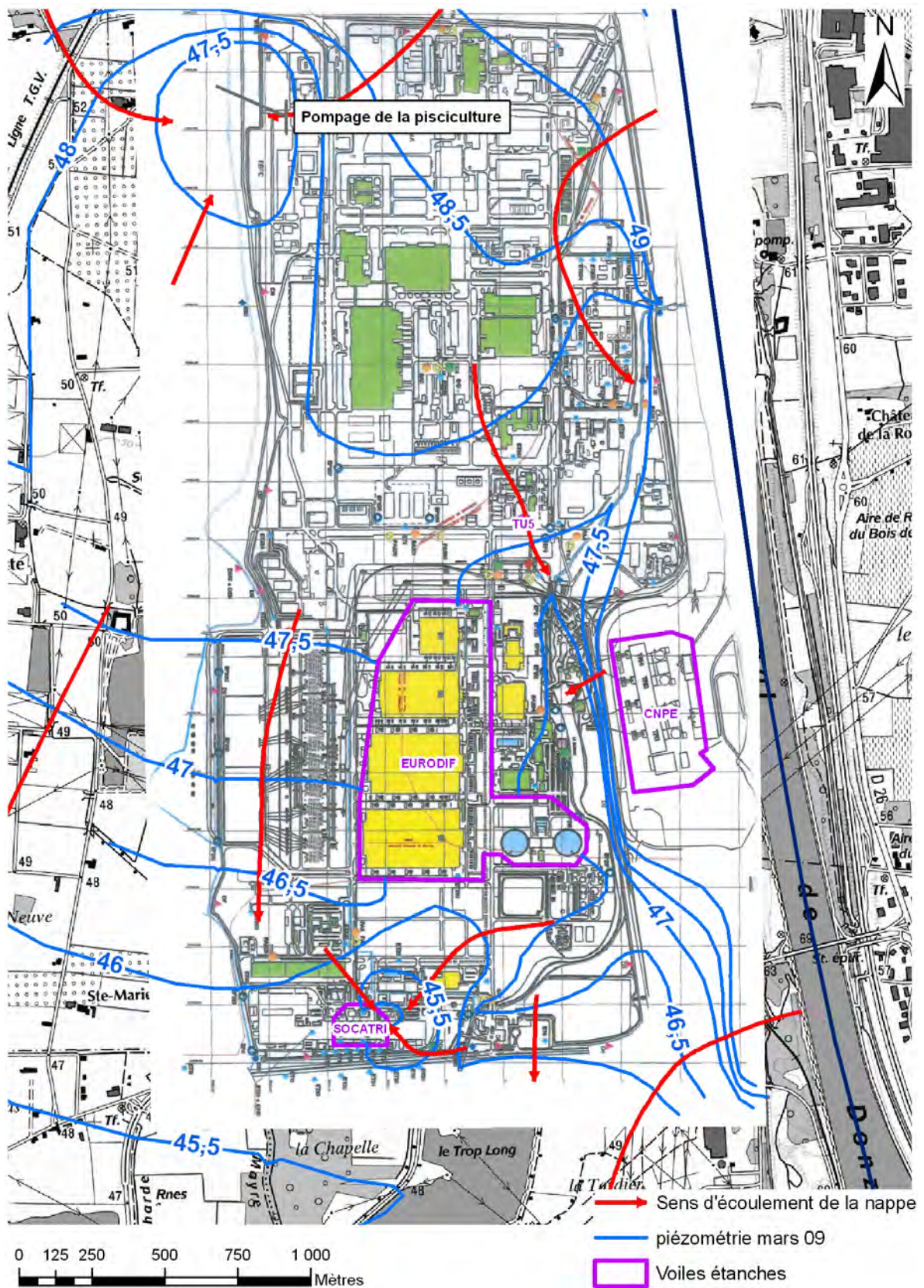


Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe des alluvions au droit du site nucléaire (mars 2009) -
 Interprétation IRSN de la carte tirée de [19]

Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe des alluvions, obtenues par interprétation des résultats des pompages d'essais et des traçages [18, 20], montrent que la vitesse d'écoulement moyenne de l'eau dans la région de Pierrelatte est de l'ordre de 1 à 10 mètres par jour. Ces vitesses correspondent à la vitesse d'écoulement naturel des molécules d'eau et non pas à la vitesse des transferts de substances chimiques pour lesquelles doivent être considérées des phénomènes physico-chimiques susceptibles de ralentir leur transfert par rapport à l'eau (adsorption, désorption, dégradation, précipitation).

La nappe des alluvions est fortement exploitée pour l'irrigation. En période de cultures, les prélèvements sont compensés par des apports en provenance du Canal de Donzère-Mondragon par l'intermédiaire de réseaux de canaux. Cet apport artificiel se traduit par une remontée du niveau de la nappe d'environ 1 mètre au-dessus de son niveau de base. Pour une saison d'irrigation, près de 2 millions de m³ d'eau sont prélevés dans le canal et injectés dans la nappe [21]. Cette remontée artificielle du niveau de la nappe ne modifie pas l'ordre de grandeur des vitesses d'écoulement (1 à 10 m/j). Les directions d'écoulement peuvent localement subir de légères modifications.

2.4.3 NAPPE DES CALCAIRES

Les formations calcaires du Crétacé renferment une nappe captive sous les formations argileuses du Pliocène. Les zones de contact de ces formations avec les alluvions sont peu connues à l'exception du secteur de Lapalud.

Cette nappe profonde et peu productive est très peu exploitée.

En conclusion, parmi les différentes nappes présentes dans le secteur d'étude, la nappe des alluvions est la principale ressource en eau de la plaine du Tricastin. Les échanges avec les autres nappes sont peu significatifs à l'échelle de la plaine.

La nappe alluviale s'écoule globalement du Nord vers le Sud à la vitesse moyenne de 1 à 10 mètres par jour. Son écoulement est fortement influencé par les différents cours d'eau qui parcourent la plaine. Dans la partie la plus septentrionale, la nappe s'écoule d'est en ouest, suivant une direction à peu près perpendiculaire au canal de Donzère-Mondragon et au Rhône. Plus au sud, l'écoulement de la nappe s'infléchit nettement vers le sud. Entre le Lauzon et le canal de fuite, la nappe est drainée vers le canal de fuite. Entre le Lauzon et le Rhône, la nappe est le plus souvent drainée vers le sud-ouest en direction du Rhône. Dans l'extrême sud de la plaine du Tricastin, le drainage de la nappe par le canal de fuite devient prépondérant par rapport au drainage par le Rhône.

2.5 RELATIONS ENTRE NAPPE ET RIVIERES

L'analyse de la nappe à l'échelle du secteur d'étude, présentée dans la section précédente, met en évidence le rôle prépondérant du Rhône, du canal de Donzère-Mondragon et des différents cours d'eau qui parcourent la plaine sur les directions d'écoulement de la nappe. Afin de mieux connaître les relations entre la nappe et ces cours d'eau, des campagnes de jaugeage⁴ ont été réalisées par ANTEA pour le compte d'AREVA en juin 2008 et mars 2009. Ces jaugeages ont permis d'évaluer les variations de débits des principaux cours d'eau du secteur d'étude (Figure 2) : la Gaffière, la Mayre Girarde, le Lauzon et le Grand Béal. Des jaugeages complémentaires ont également été réalisés en mars 2009 [19] sur des cours d'eau mineurs comme le Rialet et la Mayre Boucharde, affluents du Lauzon. La carte présentée sur la Figure 15 montre la localisation des points de jaugeage ainsi que les débits mesurés en L/s. La comparaison des mesures de débit des campagnes de juin 2008 et mars 2009 montre que les débits des cours d'eau de la plaine varient significativement au cours du temps. La situation actuelle (2008-2009) ne donne qu'une représentation partielle de celles rencontrées dans le passé.

Les échanges entre la nappe et les rivières sont conditionnés par les différences de niveau d'eau dans ces deux ensembles. De plus, le lit des rivières du secteur d'étude est établi au sein de la couverture de limons qui, par sa faible perméabilité, limite les quantités d'eau échangées. Les variations de débit observées pour un même cours d'eau, associées aux mesures piézométriques (cf. § 2.4.2), permettent d'évaluer, d'une part les éventuels apports par drainage ou ruissellement, d'autre part les pertes par infiltration. Il s'agit d'une estimation globale, les deux phénomènes pouvant intervenir sur un même tronçon.

Les observations ont permis d'établir une carte représentant les relations entre la nappe des alluvions et le réseau hydrographique, présentée en Figure 16. Sur cette figure deux modes d'alimentation de la nappe par la rivière sont distingués. L'un dénommé « direct » correspond à une continuité des niveaux d'eau dans la rivière et dans la nappe. L'autre dénommé « percolation » correspond à un niveau d'eau dans la rivière nettement plus haut que celui de la nappe. La situation pour chaque cours d'eau est la suivante :

- Les débits mesurés dans la Mayre Girarde diminuent du nord vers le sud. Le niveau d'eau dans la Mayre Girarde est nettement surélevé par rapport à celui de la nappe dans sa partie amont. La Mayre Girarde alimente la nappe.
- Le débit de la Gaffière augmente dans sa partie amont, notamment entre la prise d'eau dans le CCRD et l'usine EURODIF, indiquant un drainage important de la nappe. Dans la partie aval, au sud du site nucléaire, son débit augmente entre les deux points de mesure.

⁴ Les campagnes de jaugeages en rivière permettent de déterminer les débits d'écoulement. La mesure du débit est la résultante de 2 paramètres : 1) la section du cours d'eau en m², 2) la vitesse de l'eau en plusieurs points de ce transect en m/s.

Cependant, les niveaux de nappe mesurés indiquent que La Gaffière alimente la nappe dans la zone la plus méridionale du site nucléaire dans les conditions actuelles. Il semble donc que, dans la moitié sud du site nucléaire, la Gaffière draine d'abord la nappe (au nord), avant de l'alimenter plus au sud. Enfin, au niveau du lac Trop Long, les relations entre la nappe et la rivière semblent équilibrées (pas de gain, pas de perte).

- Le débit du Grand Béal montre une nette diminution de l'amont vers l'aval, indiquant une alimentation de la nappe des alluvions par ce cours d'eau. Cependant, la localisation de cette alimentation reste imprécise du fait du nombre limité de points de jaugeage et ne peut pas être affinée sur la base des rares données piézométriques disponibles dans ce secteur.
- Le débit du Lauzon reste quasiment constant entre la confluence Mayre Girarde-Gaffière et le lieu-dit « les Grèzes Hautes » (entre J13 et J20 sur la Figure 15) malgré l'apport du cours d'eau (La Boucharde), ce qui indique que, dans sa partie nord, le Lauzon alimente la nappe. Plus en aval, l'alimentation de la nappe par le Lauzon diminue jusqu'à atteindre un équilibre avant la confluence avec le Rhône. Dans cette zone, la nappe s'écoule sous le Lauzon, sans influence de la rivière.

En conclusion, l'étude de la piézométrie de la nappe et des débits mesurés en plusieurs points des cours d'eau situés au sud du site du Tricastin permet de préciser les relations actuelles entre la nappe et ces cours d'eau.

La Mayre Girarde alimente la nappe tout au long de son cours. La Gaffière draine la nappe dans la partie nord du site nucléaire ; son débit augmente sur sa partie amont, notamment entre la prise d'eau sur le CCRD et l'usine EURODIF indiquant un drainage important de la nappe. Elle alimente la nappe dans la zone la plus méridionale du site nucléaire. Entre le sud du site et le Lauzon, le débit de la rivière reste constant, ce qui indique soit l'absence d'échange avec la nappe, soit des échanges équilibrés. Dans sa partie nord, le Lauzon alimente la nappe. Plus en aval, l'alimentation de la nappe par le Lauzon diminue jusqu'à atteindre un équilibre avant la confluence avec le Rhône. Enfin, le débit du Grand Béal montre une diminution de l'amont vers l'aval, indiquant une alimentation de la nappe des alluvions par ce cours d'eau.

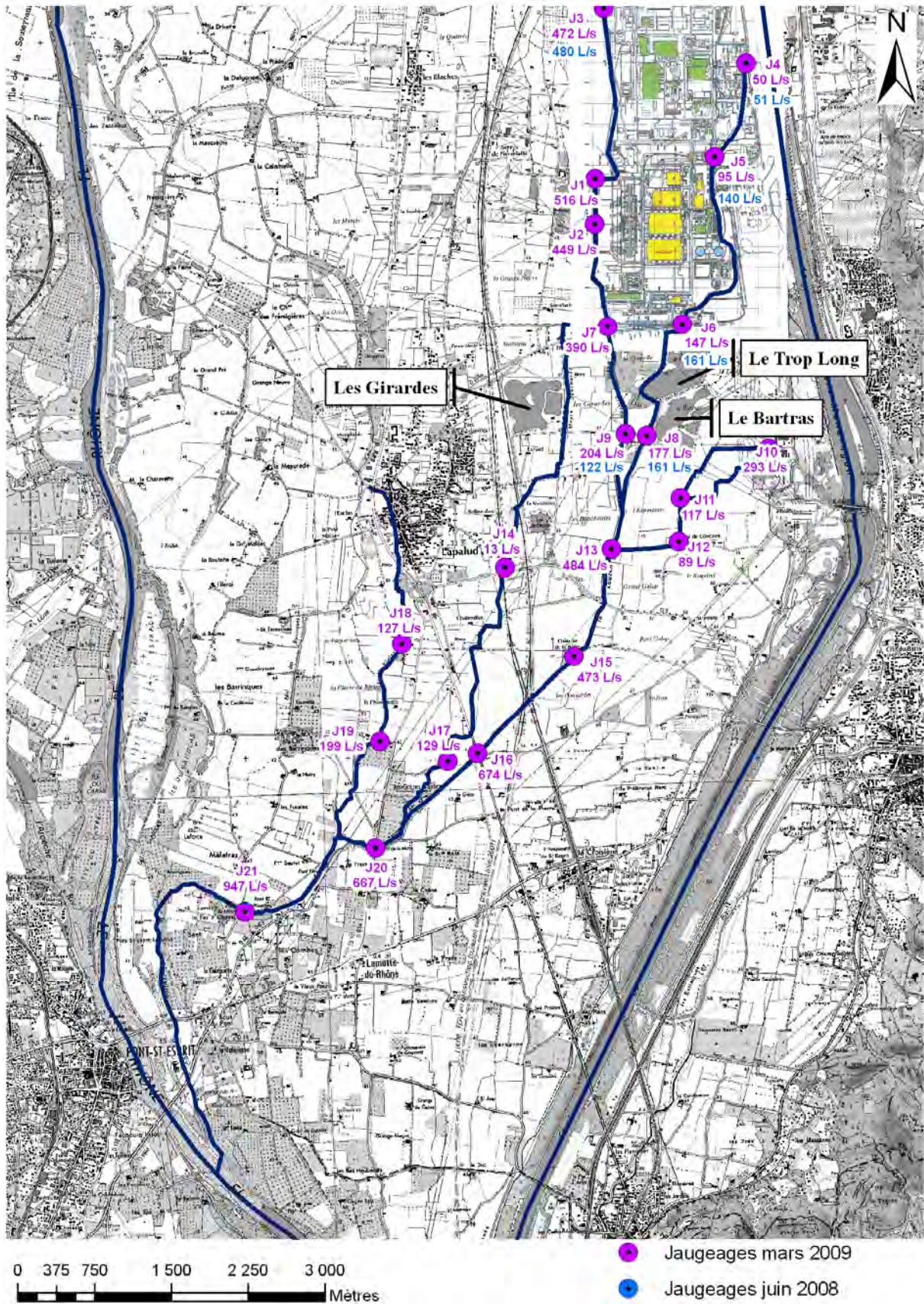


Figure 15 : Localisation des points de mesures des débits en rivière (mars 2009) - Modifiée d'après [19]

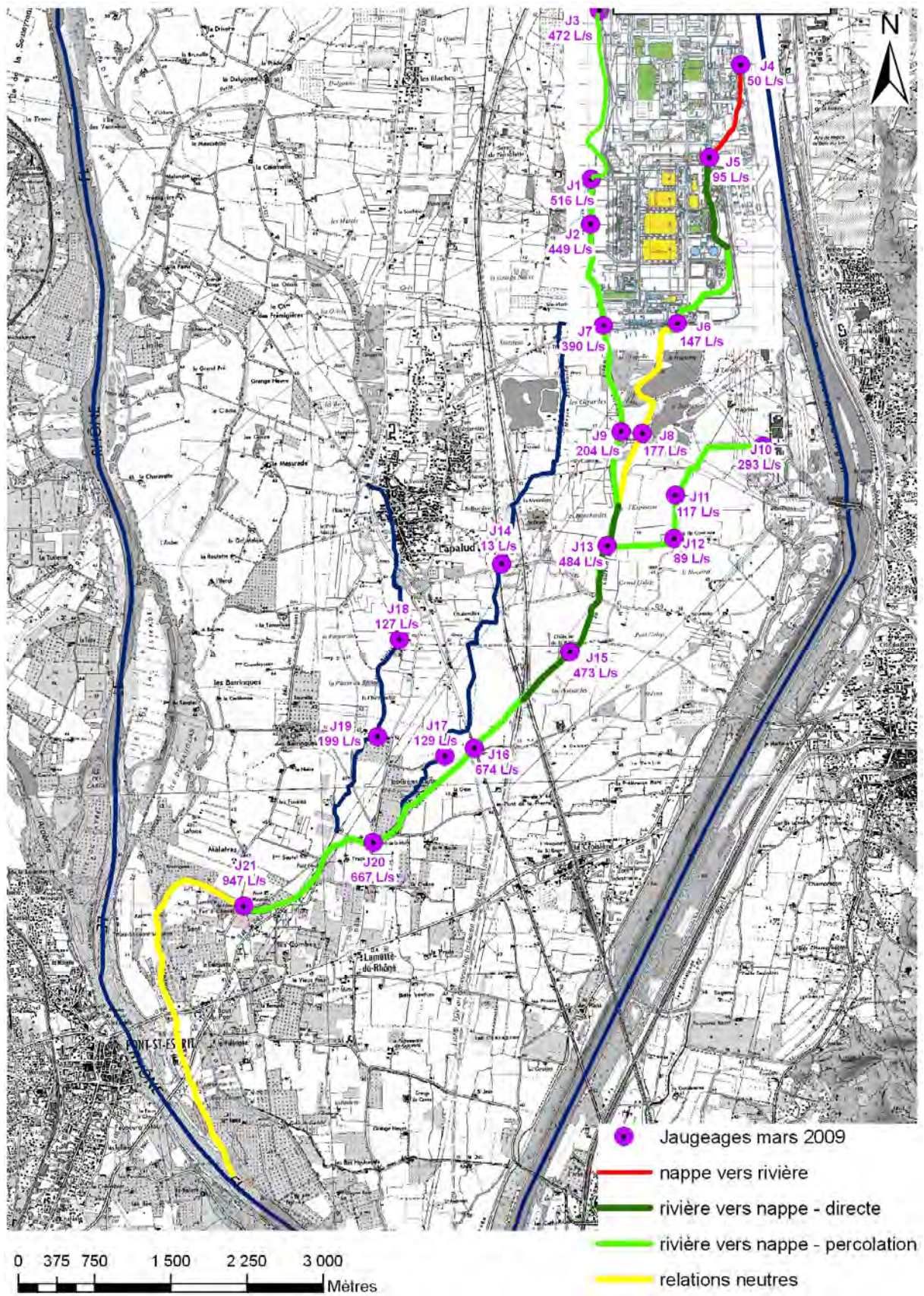


Figure 16 : Carte synthétique des relations nappe / rivières (mars 2009) - Modifiée d'après [19]

2.6 CARACTERISATION DU MARQUAGE EN URANIUM

La caractérisation du marquage en uranium est un préalable indispensable à la recherche de l'origine de l'uranium observé dans la nappe. Cette section présente dans un premier temps les principales caractéristiques de l'uranium. Dans un deuxième temps, les principales conclusions relatives au comportement de l'uranium dans la nappe présentées dans l'étude IRSN/DDASS/AREVA de 2007 sont rappelées. Cette section présente ensuite la méthode et la stratégie de prélèvements d'échantillons d'eau de nappe, puis les principales caractéristiques des points de prélèvements. Enfin, la caractérisation du marquage est présentée en termes d'évolution temporelle de la concentration en uranium dans la nappe et en termes de répartition spatiale dans l'ensemble du secteur d'étude.

2.6.1 CARACTERISTIQUES DE L'URANIUM

L'uranium est présent dans la croûte terrestre à l'état de traces [22]. Dans les roches, la teneur moyenne en uranium est de 3 à 4 ppm (mg/kg), mais la gamme de valeur est très large selon les roches et varie de 0,1 ppm dans les carbonates à 350 ppm dans les phosphates.

L'uranium est un radioélément qui possède trois principaux isotopes (^{234}U , ^{235}U et ^{238}U) qui se désintègrent successivement en émettant des rayonnements α et γ et en donnant naissance à d'autres isotopes eux-mêmes radioactifs, ceci définit les chaînes de filiation radioactive de l'uranium. La chaîne radioactive de l'uranium 238 est schématisée sur la Figure 17. Dans un environnement clos, comme au sein d'une roche, après un temps suffisamment long, les atomes d'uranium 238 et de ses descendants présentent les mêmes activités. Ils ont atteint un équilibre séculaire. Dans un milieu ouvert, comme une nappe phréatique, les descendants de l'uranium peuvent migrer, l'équilibre séculaire n'est alors jamais atteint. Ce point a été présenté dans le cadre de l'étude IRSN/DDASS/AREVA de 2007 [1] (voir § 2.6.2).

Dans les roches et le minerai, l'uranium contient 99,275 % d'uranium 238, 0,719% de l'uranium 235 (seul isotope naturellement fissile) et 0,0057% d'uranium 234.

L'origine de ce radioélément est exclusivement naturelle avec une redistribution liée aux activités anthropogéniques. Certaines activités industrielles peuvent contribuer à une augmentation des concentrations en uranium dans l'environnement :

- le cycle du combustible nucléaire,
- l'utilisation de l'uranium pour des besoins de la défense,
- l'utilisation de charbon dont la combustion conduit à l'émission atmosphérique d'uranium,
- l'utilisation dans l'agriculture d'engrais phosphatés issus de phosphates naturels, particulièrement riches en uranium.

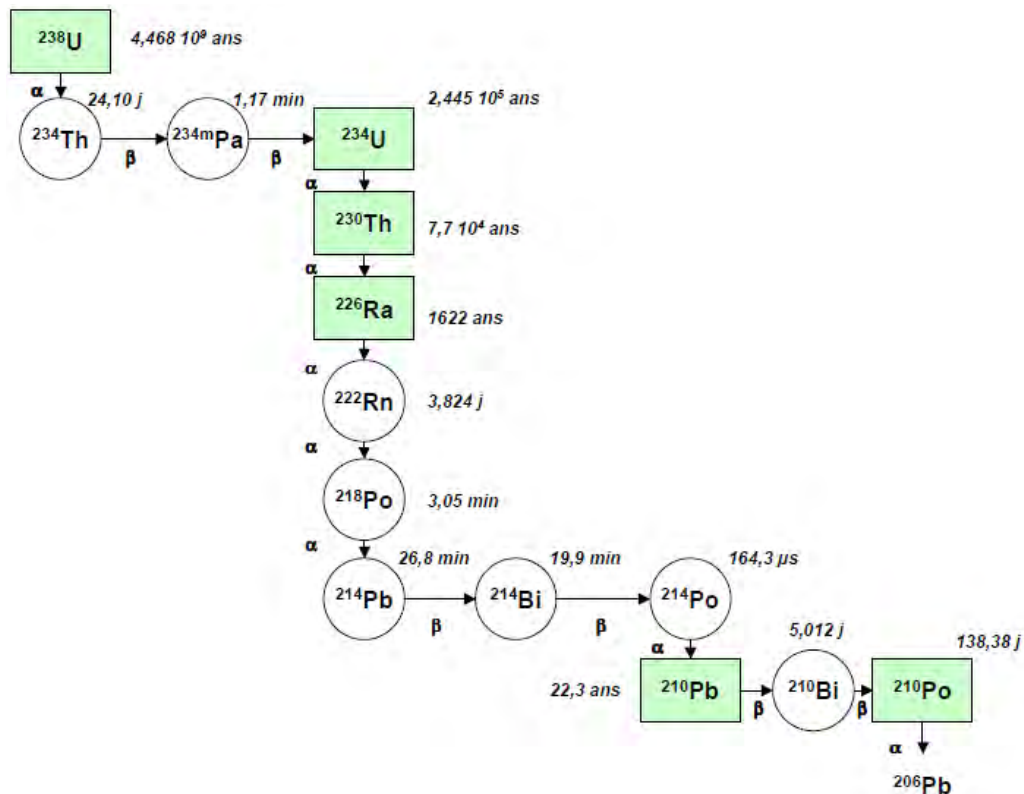


Figure 17 : Chaîne de décroissance radioactive de l'uranium 238

Pour ce qui concerne ses caractéristiques chimiques, l'uranium a quatre valences possibles (+III à +VI), les valences IV et VI étant les plus répandues dans les minerais. Les conditions de passage de la valence IV à la valence VI dépendent du potentiel d'oxydoréduction du milieu. Ainsi, la solubilité de l'uranium en milieu aquatique est liée aux conditions d'oxydoréduction du milieu. Dans des conditions oxydantes (augmentation de la concentration en oxygène dissous), l'uranium devient plus facilement soluble (passage de la valence IV à la valence VI). Les conditions oxydantes favorisent la complexation de l'uranium en solution avec certains ligands. Les principaux ligands sont, par ordre d'affinité décroissante:

- les carbonates,
- les groupements hydroxyles,
- les phosphates.

Il convient de noter que l'uranium présente une très forte affinité pour les oxy-hydroxydes de fer. Cette adsorption peut s'effectuer très rapidement lors de changements des conditions d'oxydoréduction. Une diminution de la teneur en oxygène (condition réductrice) engendre une précipitation rapide de l'uranium sous formes d'oxyde (UO₂).

Dans un aquifère tel que celui de la nappe alluviale du Tricastin, les conditions chimiques des eaux souterraines dépendent de la géologie (composition minéralogique, présence de matière organique) et des échanges d'eau avec les eaux de surface (cours d'eau, infiltration d'eau de pluie, mise en contact

avec l'atmosphère dans des puits...) ou avec des eaux provenant d'autres aquifères. Ainsi, les conditions chimiques et donc la solubilité de l'uranium peuvent varier de place en place, et au cours du temps. Il résulte, du fait que l'uranium se fixe sur la matrice géologique dans une proportion variable dans le temps et l'espace que, d'une part l'uranium se déplace dans l'aquifère plus lentement que l'eau et cette propagation peut être modifiée localement (ce point est examiné au § 2.6.5.2), d'autre part les conditions dans lesquelles l'eau de la nappe est prélevée dans l'aquifère et conditionnée ensuite ont une influence forte sur la quantité d'uranium en solution dans l'eau (ce point a été pris en compte pour évaluer la représentativité des résultats des analyses d'eau et pour définir un protocole de prélèvement d'échantillons d'eau - voir § 2.6.3).

Deux grandes catégories de techniques de mesures peuvent être appliquées pour déterminer les teneurs en uranium pondéral (somme de tous les isotopes de l'uranium) et celles de ses différents isotopes :

- mesures de type pondéral (ICP-MS), utilisées notamment pour les échantillons liquides ;
- mesures des émissions radioactives (radiochimie puis spectrométrie α , scintillation liquide, spectrométrie γ), utilisées pour les échantillons solides.

La précision des appareils de mesures (ICP-MS) permet de mesurer des concentrations faibles de l'ordre du microgramme par litre. La méthode d'analyse par ICP-MS, la plus couramment utilisée dans cette étude, conduit à des incertitudes sur les mesures estimées à environ 10 % pour l'uranium pondéral et environ 20 % pour les rapports isotopiques.

2.6.2 L'URANIUM ET SES DESCENDANTS DANS LES EAUX SOUTERRAINES

Dans les roches et le minerai (environnement clos), l'équilibre séculaire entre l'uranium 238 et ses descendants (^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb) peut s'établir. L'instauration de cet équilibre nécessite un laps de temps très long (plusieurs centaines de milliers d'années), du fait des périodes très longues des radionucléides (Figure 17). Le traitement industriel du minerai d'uranium et sa conversion en UF_4 conduisent à l'élimination des descendants de l'uranium. Seuls les isotopes de l'uranium (^{238}U , ^{235}U et ^{234}U) restent dans des proportions similaires à celles du minerai. L'absence d'équilibre séculaire de l'uranium et de ses descendants dans les eaux de la nappe pourrait alors être interprétée comme un traceur des activités du site nucléaire.

Cependant, les concentrations en radionucléides dans les eaux de nappe sont le résultat de phénomènes complexes (solubilisation, adsorption, désorption, précipitation, etc...). Ces phénomènes varient fortement d'un radionucléide à l'autre car les concentrations sont régies par les conditions physico-chimiques de l'aquifère et les propriétés de certains éléments qui sont plus ou moins solubles ce qui se traduit par des différences significatives de mobilité.

Les mesures effectuées dans le cadre de l'étude IRSN/DDASS/AREVA de 2007 [1] montrent que les descendants ne sont pas à l'équilibre séculaire avec l'uranium dans les eaux. Les données produites, à savoir l'activité de l'uranium (^{238}U et ^{235}U) et de ses descendants (^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po et ^{210}Pb) n'ont pas permis de discriminer l'origine naturelle ou anthropique de l'uranium [1]. Les concentrations des descendants de l'uranium dans les eaux souterraines n'ont donc pas été utilisées pour comprendre l'origine de l'uranium.

2.6.3 METHODE ET STRATEGIE DE PRELEVEMENTS

La concentration en uranium dépendant fortement de la chimie des eaux naturelles, il importe que le prélèvement d'échantillons d'eau de la nappe soit réalisé aussi directement que possible dans la nappe. Il faut également s'assurer que le pompage de l'eau ne perturbe pas les conditions physico-chimiques et n'induit pas de modifications des concentrations de l'uranium dans l'eau. C'est la raison pour laquelle les organismes qui ont effectué des prélèvements dans le cadre de cette étude (AREVA, LDA26 et IRSN) ont adopté un protocole commun de prélèvements respectant les normes existantes, notamment les recommandations du fascicule technique AFNOR FD X 31-615 [23].

A partir des résultats obtenus, d'une part lors de l'étude de 2007, d'autre part lors du plan de surveillance mis en place après l'incident de SOCATRI, une stratégie de prélèvements a été définie.

Afin de cartographier avec précision les niveaux élevés des concentrations d'uranium dans la nappe, une première campagne de prélèvement a été réalisée (mars 2009) au sud du site nucléaire par l'IRSN et AREVA. L'ensemble des points de prélèvement (forages ou puits appartenant à un particulier) ont été identifiés grâce notamment au concours des DDASS dans une aire géographique limitée au nord par le site nucléaire du Tricastin et au sud par le Rhône et le canal de Donzère-Mondragon. Afin d'avoir une vision la plus exhaustive possible, les 82 points qui n'avaient pas été suivis dans le cadre du Plan de Surveillance ont fait l'objet d'un prélèvement et d'une analyse en uranium pondéral (voir Tableau 1). La moitié des prélèvements et des analyses ont été effectués par AREVA, l'autre moitié par l'IRSN.

Dans le but d'évaluer la concentration moyenne en uranium dans la nappe dans les zones hors influence du site nucléaire (amont hydraulique), une deuxième campagne de prélèvements (juin à septembre 2009) a concerné les forages localisés à l'est, à l'ouest et au nord du site nucléaire. Afin de préparer cette campagne de prélèvements, les DDASS ont organisé une réunion avec les maires des communes concernées le 15 mai 2009 aux Granges Gontardes. Cette réunion ainsi que le concours de la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêt de la Drôme ([24, 25]) ont permis de faciliter l'identification des 54 points et l'accès à ces points qui ont fait l'objet d'un prélèvement. En complément des analyses en uranium pondéral, des mesures *in situ* (Eh, pH, conductivité et température) ont été réalisées et les concentrations en différents éléments chimiques ont été

mesurées (voir Tableau 1). La moitié des prélèvements et des analyses ont été effectués par AREVA, l'autre moitié par l'IRSN.

A la demande du Groupe de Suivi, une troisième campagne de prélèvements a été organisée en juin 2009 sur le site nucléaire du Tricastin. Cette campagne visait à disposer de mesures indépendantes de celles fournies par AREVA. Elle a conduit à réaliser des analyses contradictoires entre AREVA, le LDA26 et l'IRSN sur l'eau prélevée dans 16 piézomètres du site nucléaire. Ces analyses contradictoires (voir Tableau 1) ont concerné l'uranium (AREVA, LDA26, IRSN) et des éléments chimiques (AREVA, LDA26). **Pour répondre à une demande du Groupe de Suivi, des mesures de tritium dans les eaux de la nappe prélevées dans les 16 piézomètres sélectionnés sur le site ont été réalisées par l'IRSN.** Ces mesures ont été complétées par des mesures de tritium sur des eaux prélevées dans quelques forages privés situés au sud du site nucléaire. Les résultats de ces analyses ainsi que la localisation des points de prélèvement sont reportés en Annexe 4. **Ils montrent des activités volumiques de tritium de même niveau dans les eaux de nappe prélevées au sud du site nucléaire et sur celui-ci (3 à 6 Bq/L) à l'exception de celles du piézomètre ET11 (13,3 Bq/L) localisé à l'est du site nucléaire du Tricastin et à l'extrémité nord du Centre Nucléaire de Production d'Electricité d'EDF.** Ces activités volumiques en tritium sont comparables à ce qui peut être observé naturellement dans les eaux souterraines [26] et sont inférieures à la valeur de référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (100 Bq/L⁵) [27].

Afin de compléter la cartographie des teneurs des différents éléments chimiques dans la nappe, une quatrième campagne (octobre 2009) a été menée dans le sud du secteur d'étude. Elle s'est intéressée en particulier à la mesure de la concentration dans la nappe de différents éléments chimiques utilisés sur le site nucléaire. Cette campagne réalisée par le LDA26 a concerné 20 points de prélèvement (voir Tableau 1).

⁵ La présence de concentrations élevées de tritium dans l'eau peut être le témoin de la présence d'autres radionucléides artificiels. En cas de dépassement de la référence de qualité, il est procédé à l'analyse des radionucléides spécifiques définis dans l'arrêté mentionné à l'article R.1321-20

Tableau 1 : Les différentes campagnes de prélèvements/mesures menées lors de l'étude sur l'origine de l'uranium dans la nappe du Tricastin et lors du Plan de Surveillance.

		Nombre de prélèvements	Analyses effectuées
Etude	Campagne 1 : « sud du site » (AREVA, IRSN)	82	uranium pondéral
	Campagne 2 : « nord, ouest et est du site » (AREVA, IRSN)	54	U, B, Cr, Ni, Fe, F, Ca, carbonates, + paramètres <i>in situ</i>
	Campagne 3 : « site nucléaire » (AREVA, IRSN, LDA26)	48	²³⁸ U, ²³⁵ U, B, Cr, Ni, Fe, F, Ca, Mg, HCT, carbonates, TCE, PCE + paramètres <i>in situ</i> Tritium
	Campagne 4 : « sud complémentaire »	20	U, B, Cr, Ni, Fe, F, Ca, carbonates + paramètres <i>in situ</i>
Plan de Surveillance	SOCATRI	2221	uranium pondéral
	LDA26	691	U, F et Cr + ions et métaux
	IRSN	146	uranium pondéral

Les résultats d'analyses ont été systématiquement communiqués par courrier aux particuliers et aux collectivités qui ont accepté que des prélèvements soient réalisés dans leurs forages.

2.6.4 ELABORATION D'UNE BASE DE DONNEES DES RESULTATS

La caractérisation du marquage par l'uranium de la nappe dans la plaine du Tricastin (Figure 23) s'appuie sur l'ensemble des données acquises dans le cadre de l'étude IRSN/DDASS/AREVA de 2007, du plan de surveillance et de la présente étude. Outre les teneurs en uranium dans l'eau, des résultats de nombreuses analyses chimiques et de l'isotopie de l'uranium ont été également prises en compte. Ainsi, plus de 4300 résultats d'analyses ont servi de base à l'étude. Afin de permettre leur utilisation, ces résultats ont été enregistrés dans une base de données qui est organisée à partir des points de prélèvements. Chaque point de prélèvement est décrit et associé à l'ensemble des résultats d'analyses effectuées sur les prélèvements d'eau opérés au cours du temps en ce point. La constitution de cette base de données a nécessité, entre autres choses, un important travail de vérification des données. Il s'agissait, par exemple, de regrouper les résultats associés à un point de prélèvement auquel plusieurs

dénominations avaient pu être données au cours du temps, par les différents intervenants. A l'opposé, dans certains cas, une même dénomination avait pu être attribuée à plusieurs points.

Ce travail a mis en évidence la nécessité d'une description des principales caractéristiques des points de prélèvement. Cette caractérisation est également nécessaire pour apprécier la représentativité des eaux prélevées par rapport à l'eau de la nappe, compte tenu de l'importance des conditions chimiques évoquées au paragraphe 2.6.1.

Les points de prélèvement (près de 400) sont, pour l'essentiel, des forages captant la nappe des alluvions à des fins d'alimentation en eau potable, collective (AEP collectif), particulière (AEP particulier) ou d'irrigation (AEI). Des piézomètres⁶, appartenant à la CNR, à AREVA ou à la SNCF, implantés dans la plaine du Tricastin ont également fait l'objet de prélèvements pour mesurer la concentration en uranium dans l'eau de nappe.

Les forages de particuliers sont presque toujours anciens (plusieurs décennies) ; les méthodes de forage utilisées à l'époque étaient rudimentaires (enfouissement de tubes troués dans les alluvions), mais suffisantes pour atteindre la nappe peu profonde dans les terrains alluvionnaires ; les systèmes de pompage mis en place occupent la totalité du diamètre du forage, les têtes de puits sont souvent scellées pour empêcher une contamination de la nappe par les écoulements surfaciques. Ces installations limitent la possibilité d'obtenir des informations sur la profondeur du forage (terrains rencontrés), son diamètre, la profondeur d'aspiration (eau superficielle ou eau profonde), les tubages employés (PVC, acier, inox, ...) ou les hauteurs des crépines. De plus, les terrains sur lesquels sont implantés les ouvrages ont parfois changé de propriétaires, contribuant à la perte d'informations. Des photos de forages de particuliers sont présentées sur la Figure 18 à titre d'exemple.

Les forages des particuliers étaient, pour l'essentiel, utilisés à des fins d'alimentation en eau potable des foyers et reliés à des canalisations, des ballons et des surpresseurs permettant de distribuer l'eau dans l'habitation. Ainsi, les prélèvements réalisés dans ces ouvrages ne sont pas toujours représentatifs de la qualité de l'eau de la nappe et peuvent être affectés par le réseau de distribution (oxygenation de l'eau). Ceci a en particulier été mis en évidence sur le point de prélèvement AEP4. L'échantillonnage de l'eau de nappe était réalisé à la sortie d'un système comportant un pompage en nappe, un ballon de stockage de l'eau prélevée, des filtres et un surpresseur permettant d'assurer l'alimentation en eau de l'habitation. Les premières analyses réalisées en juillet 2008 sur ce point de prélèvement ont montré des concentrations élevées en uranium de l'ordre de 70 à 80 µg/L. Après investigations, il est apparu que les filtres, le ballon et le surpresseur présentaient un entartrage important à l'origine d'une accumulation de l'uranium. Le remplacement de l'installation de

⁶ Un piézomètre présente généralement un diamètre inférieur à celui d'un forage. Il est dédié à la surveillance des niveaux de nappe et permet des débits de pompage inférieurs à un forage de plus grand diamètre.

distribution d'eau a permis alors d'observer des concentrations en uranium proches de 4 µg/L. L'identification des valeurs erronées a conduit à leur élimination.

L'ensemble des captages AEP collectifs des communes concernées par l'étude a fait l'objet d'un prélèvement d'eau. L'accès à ces ouvrages s'est trouvé facilité par les contacts pris lors de la réunion d'information du 15 mai 2009 en présence des maires des communes du secteur d'étude, de la DDASS 26, de la DDAF 26, d'AREVA et de l'IRSN [25]. Ces ouvrages sont facilement accessibles et les informations disponibles sont complètes (Figure 18).

Pour faciliter l'accès direct à la nappe des alluvions, les prélèvements au nord, à l'ouest et à l'est du site nucléaire ont été réalisés sur des forages d'irrigation (AEI) présentant des diamètres plus importants : ceci donne la possibilité de mesurer le niveau piézométrique et l'absence d'installation connexe ne modifie pas les conditions physico-chimiques de l'eau. Les localisations et les contacts avec les propriétaires de ces ouvrages résultent d'une convention signée entre la DDAF 26 et l'IRSN [24].

Des prélèvements ont également été réalisés dans des piézomètres présents dans la plaine du Tricastin (CNR et SNCF). Certains piézomètres, en raison de leur petit diamètre ou de leur colmatage, ne permettent pas une bonne circulation de l'eau (piézomètres peu productifs). L'eau prélevée dans ces piézomètres peut alors être une eau stagnante, non représentative de la nappe. Enfin, l'étude s'est intéressée aux piézomètres présents sur le site nucléaire pour lesquels les données disponibles sont de qualité et font l'objet d'un suivi périodique.

Au vu de la disparité des ouvrages utilisés pour l'étude et de la connaissance parfois limitée de leurs caractéristiques techniques, des écarts notables de concentrations peuvent être observés. Compte tenu des difficultés de connaître les caractéristiques des forages et du grand nombre de points de prélèvement, expliquer chaque variation individuelle n'est pas envisageable. Aussi, dans la suite de ce rapport, les informations disponibles seront regroupées pour des zones présentant un même comportement moyen.



Figure 18 : Exemples de captages dans la plaine du Tricastin. a) AEP particuliers ; b) AEP collectif ; c) piézomètres site

2.6.5 EVOLUTION TEMPORELLE DE LA CONCENTRATION EN URANIUM DANS LA NAPPE

2.6.5.1 Cas des forages privés suivis dans le cadre du plan de surveillance

Les mesures réalisées lors de la première étude IRSN/DDASS/AREVA en 2007 et la surveillance réalisée depuis le mois de juillet 2008, ont permis de mettre en évidence la présence de concentrations élevées d'uranium antérieures à l'incident (donc non imputables à l'incident SOCATRI) en certains points d'une zone délimitée par le Lauzon, le canal de Donzère-Mondragon et le Rhône. Cette zone a fait l'objet d'une surveillance, c'est-à-dire de prélèvements réguliers (944 prélèvements : 90% par AREVA - 10% par l'IRSN) réalisés dans 26 forages privés qui présentent des concentrations en uranium supérieures à 5 µg/L. Les résultats de cette surveillance ont montré que, dans l'ensemble, les teneurs en uranium étaient stables dans le temps (Figure 19). Cette observation est confirmée par les faibles valeurs des écarts-types⁷ (de l'ordre du µg/L).

⁷ L'écart-type permet de mesurer la dispersion d'une série de valeurs autour de leur moyenne

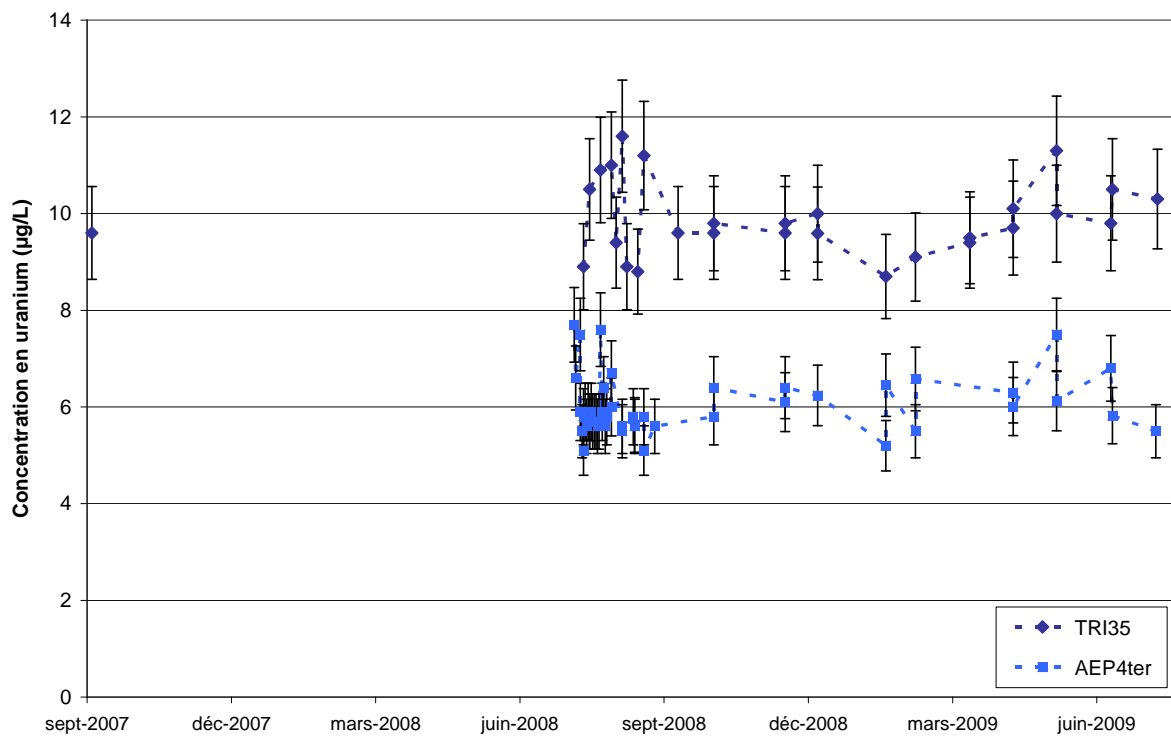


Figure 19 : Evolution temporelle des concentrations en uranium mesurées dans deux captages AEP de particuliers dans le cadre du Plan de Surveillance (juillet 2008 - juin 2009) et lors de l'étude conjointe IRSN/DDASS/AREVA (septembre 2007)

Il conviendra de retenir que, pour certains points, les analyses ont été réalisées en double par AREVA et l'IRSN. Les différences observées restent dans les incertitudes⁸ des mesures de concentrations de l'uranium (de l'ordre de 10%).

⁸ Incertitude de mesure : paramètre associé au résultat d'une mesure qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à la grandeur mesurée.

2.6.5.2 Cas des forages mis en place le long du Lauzon à la suite de l'incident

SOCATRI

Au mois de juillet 2008, 12 piézomètres (ET300 à ET311) atteignant la nappe des alluvions ont été implantés par AREVA, en bordure du Lauzon, pour détecter un éventuel transfert d'uranium vers la nappe (Figure 20). Ces ouvrages ont été suivis à une fréquence bihebdomadaire pendant près de 18 mois (Figure 21).

Le Tableau 2 reprend les informations disponibles sur ces piézomètres relatives à leur profondeur et à la distance qui les sépare du Lauzon.

Tableau 2 : Informations relatives aux piézomètres installés en bordure du Lauzon

Désignation	Coordonnées Lambert 3		Profondeur (m)	Distance piézomètre - Lauzon (m)
	X	Y		
ET300	787280,820	222076,448	17	50
ET301	787262,884	221968,496	15	130
ET302	787212,197	221862,000	15	250
ET303	787276,342	222229,504	15	75
ET304	787256,586	222313,898	15	175
ET305	787304,374	222396,344	15	230
ET306	788815,999	223570,089	11,2	30
ET307	788824,424	223521,377	12	70
ET308	788835,664	223479,49	11	110
ET309	788849,415	223652,021	13	5
ET310	788802,532	223673,314	12	55
ET311	788675,951	223713,566	9	170

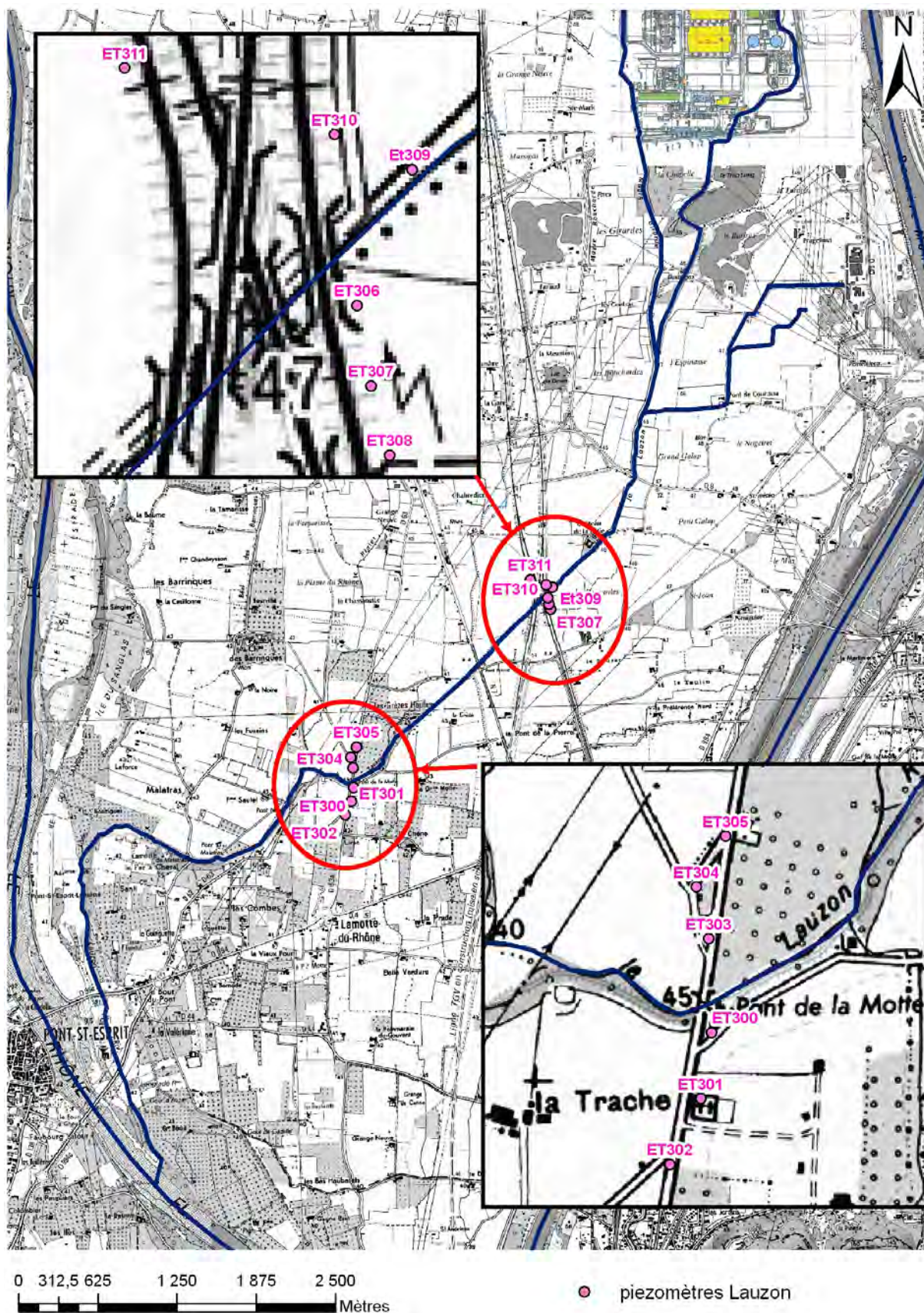


Figure 20 : Localisation des piézomètres implantés par AREVA en bordure du Lauzon en juillet 2008

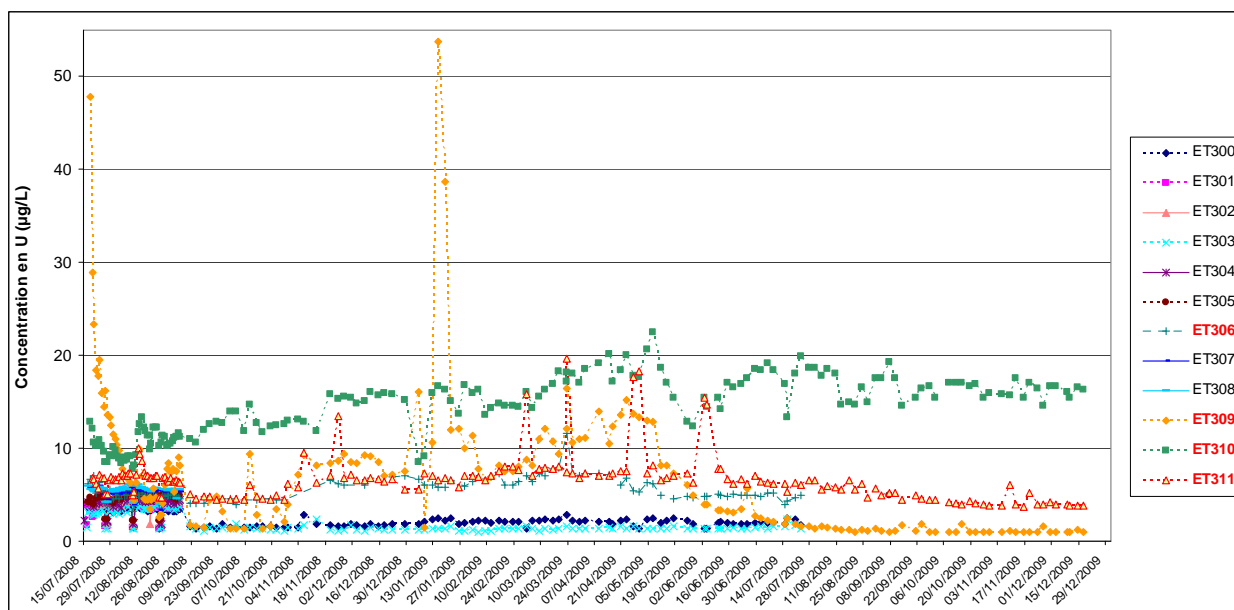


Figure 21 : Evolution temporelle des concentrations en uranium dans les piézomètres implantés en bordure du Lauzon

Seuls les piézomètres ET309 et ET310 ont montré des teneurs anormalement élevées, soit de façon épisodique (ET309), soit de manière plus continue (ET310). A ainsi été observé le passage de la pollution liée à l'incident au point ET309 situé à moins de 5 mètres du Lauzon, avec un retour à une valeur comparable à celles des autres points une vingtaine de jours plus tard. Un front de contamination semble s'être dessiné sur le piézomètre ET309. Une augmentation ponctuellement importante de la concentration en uranium est également observée mi-janvier 2009 dans le piézomètre ET309 (pic supérieur à 50 µg/L) à la suite d'une période de forte pluviométrie.

Les concentrations en uranium mesurées pendant plus d'un an dans le piézomètre ET309 ont été confrontées à un modèle analytique de transport de soluté (voir *Annexe 5*) permettant de simuler la concentration d'un élément donné à une distance connue au cours du temps. La Figure 22 présente la comparaison entre cette simulation et les observations. Les paramètres utilisés pour cette simulation correspondent à un facteur de retard d'environ 60 pour l'uranium, ce qui signifie que l'uranium se déplace 60 fois moins vite que l'eau de la nappe. En considérant (voir § 2.4.2) que la vitesse de transfert de l'eau dans la nappe du Tricastin est de l'ordre de 1 à 10 m par jour, cela conduit à des valeurs de vitesse de transfert de l'uranium dans la nappe allant de 1,5 à 15 cm/jour soit 5,5 à 55 m par an. Il est à noter qu'un facteur de retard de 60 pour l'uranium correspond à un coefficient dit de partition⁹ de 3 à 4 L/kg. Cette valeur est dans la fourchette des valeurs indiquées dans la

⁹ Le facteur de retard est un coefficient de proportionnalité entre le déplacement de l'eau et le déplacement du soluté. La relation liant le facteur de retard au coefficient de partition est reprise en *Annexe 5*.

bibliographie [28, 29]. Celles-ci vont en effet de 0,055 L/kg à 20 000 L/kg avec une valeur attendue proche de 33 L/kg pour des sables.

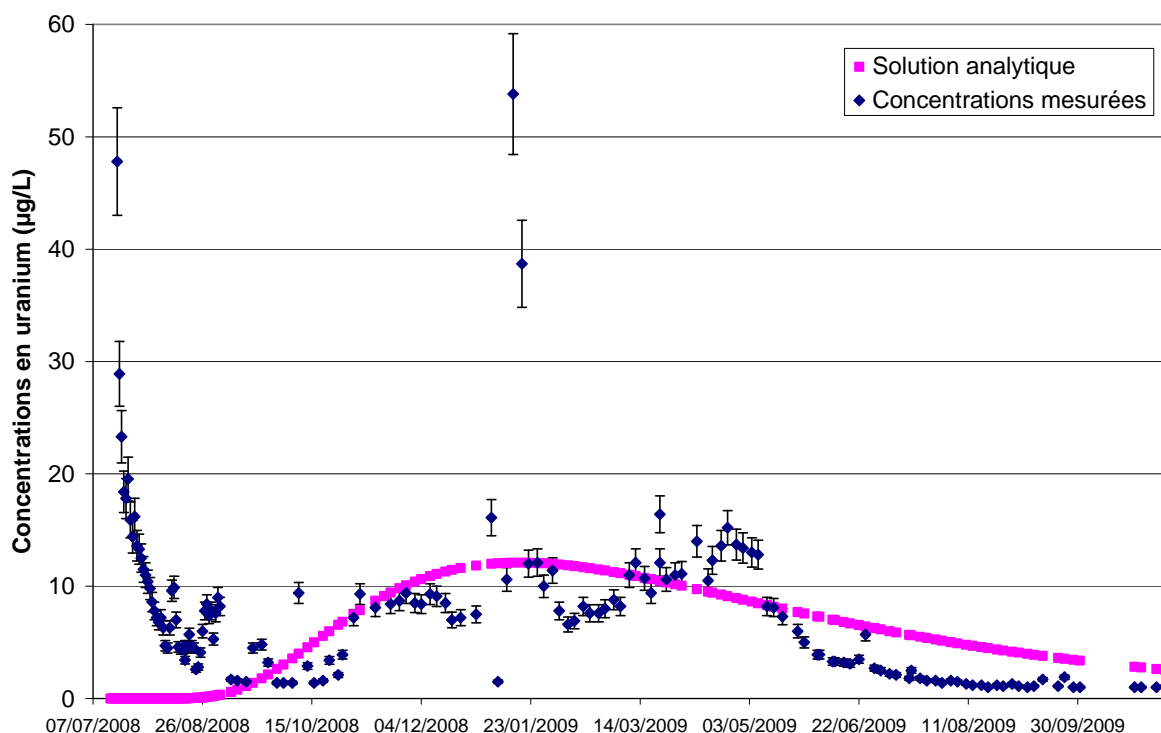


Figure 22 : Simulation des concentrations en uranium dans le piézomètre ET309 par une solution analytique

2.6.6 ETUDE DE LA VARIATION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN URANIUM DANS LA NAPPE DU TRICASTIN

L'ensemble des données recueillies, d'une part dans le cadre du plan de surveillance environnemental mis en place à la suite de l'incident SOCATRI de juillet 2008, d'autre part dans le cadre des campagnes de prélèvement effectuées par l'IRSN et AREVA en 2009, permet de dresser une cartographie de la teneur en uranium de la nappe autour du site nucléaire du Tricastin. Au total, près de 400 points ont fait l'objet d'une ou plusieurs mesures de la concentration en uranium. Les 400 points de prélèvement n'ont pas fait l'objet d'un nombre équivalent d'analyses. Les forages privés appartenant au Plan de Surveillance ont été suivis pendant plus d'un an à une fréquence journalière puis hebdomadaire et enfin mensuelle, ce qui représente jusqu'à 65 prélèvements par puits. A l'inverse, les ouvrages n'ayant pas montré d'anomalie n'ont fait l'objet que d'un seul prélèvement. Pour corriger cette variabilité dans les prélèvements, seules les concentrations moyennes en uranium en chaque point sont prises en compte pour les représentations spatiales.

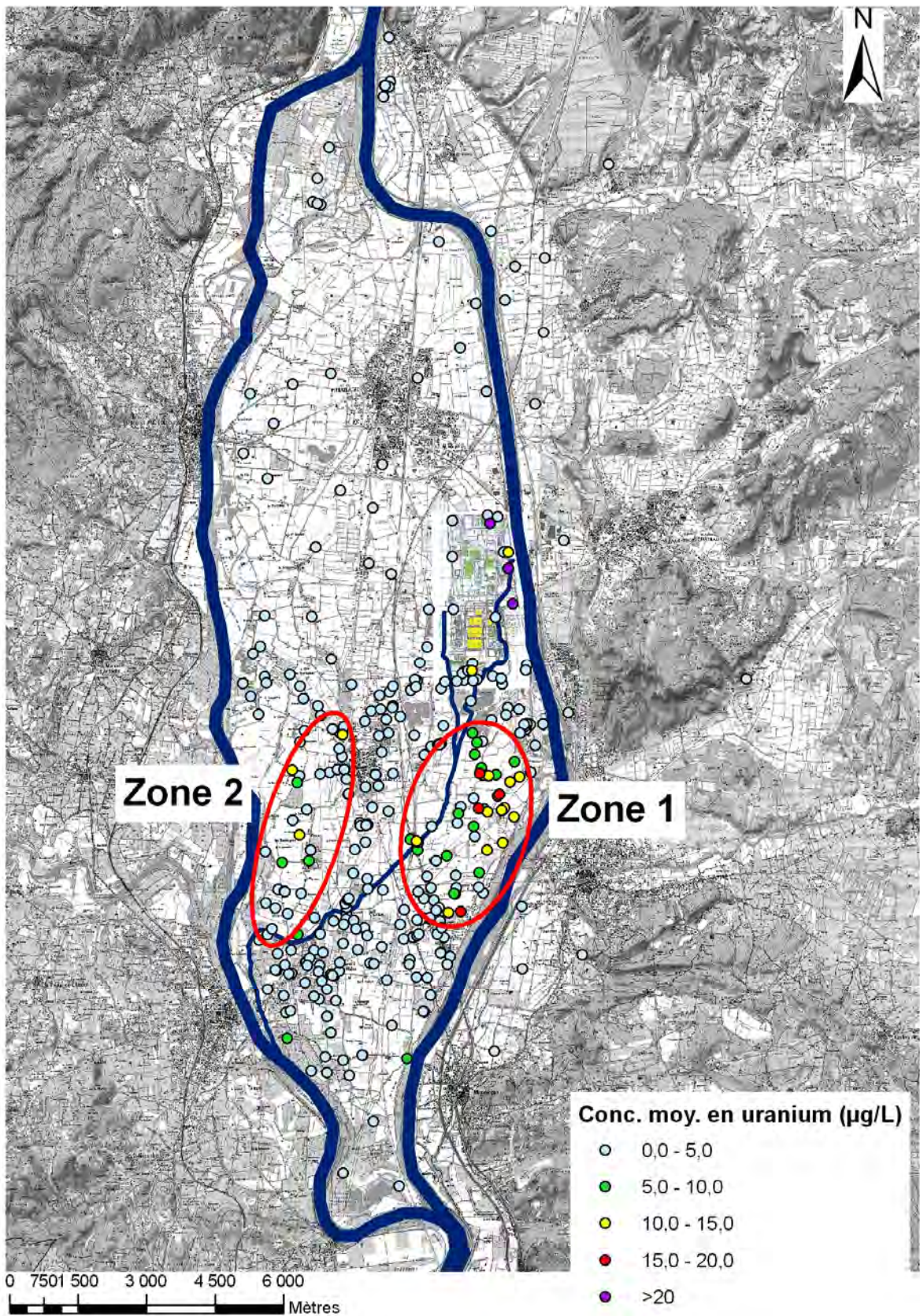


Figure 23 : Cartographie de la concentration en uranium dans la nappe du Tricastin obtenue dans le cadre de l'étude IRSN/DDASS/AREVA (2009)

La Figure 23 permet de visualiser l'ensemble des mesures de concentrations en uranium effectuées en 2008 et 2009. L'examen de cette carte montre que :

- moins de 1,5 % des points de mesure présentent des concentrations en uranium supérieures à la valeur guide pour les eaux de boisson de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est de 15 µg/L ;
- environ 90 % des points montrent des concentrations en uranium inférieures à 5 µg/L ;
- aucune valeur supérieure à 5 µg/L n'est observée au nord, à l'ouest et à l'est du site nucléaire ;
- les points présentant les concentrations les plus importantes (>20 µg/L) en uranium sont localisés sur le site nucléaire ;
- à l'exception du site nucléaire, les points présentant des concentrations en uranium supérieures à 5 µg/L se répartissent, dans leur grande majorité, dans deux zones. L'une est localisée directement au sud du site nucléaire et contient la totalité des points identifiés en 2007 et 2008 (zone 1) ; l'autre est située au sud-ouest du site nucléaire (zone 2) ;

La zone 1 couvre une surface d'approximativement 4 km de long et 2 km de large. Ainsi, en considérant une épaisseur moyenne des alluvions proche de 10 mètres et une porosité de 10 % (rapport entre le volume d'eau et le volume de roche), le volume d'eau contenu dans la zone 1 peut être estimé à 8 millions de mètres cubes. En considérant une concentration moyenne en uranium de 10 µg/L dans cette zone, la quantité d'uranium présente peut alors être estimée à 80 kg.

3 EXAMEN DES HYPOTHESES POUVANT EXPLIQUER LES CONCENTRATIONS ELEVEES EN URANIUM

Dans sa deuxième phase, l'étude s'est attachée à tester trois hypothèses possibles quant à l'origine des concentrations plus élevées observées dans les zones 1 et 2. Ces trois hypothèses sont les suivantes :

- les concentrations élevées sont liées aux conditions géologiques locales (influence de formations riches en uranium) ;
- les concentrations en uranium ont une origine anthropique autre que l'activité du site nucléaire du Tricastin ;
- enfin, la présence d'uranium dans l'eau de la nappe est liée au site nucléaire du Tricastin.

Dans ce chapitre, les trois hypothèses sont successivement examinées.

3.1 1^{ERE} HYPOTHESE : ORIGINE LIEE A LA GEOLOGIE LOCALE

L'uranium est présent, à des teneurs variées, dans de très nombreuses roches. Il se retrouve donc, à des teneurs variables, dans les eaux des nappes souterraines. L'IRSN a par exemple procédé à l'analyse de la teneur en uranium de 472 eaux de distribution en France entre 2005 et 2007 et a trouvé que les valeurs se situaient dans une fourchette allant de 0,15 à 112,5 µg/L, pour une teneur moyenne de 3 µg/L [30, 31]. Ces résultats montrent que, dans certaines régions, les conditions géologiques locales peuvent conduire à des teneurs élevées en uranium naturel dans les eaux de nappes.

Pour ce qui concerne la région d'étude, des travaux réalisés en 2008 par l'IRSN [32] sur la commune d'Aigaliers dans le Gard ont montré l'impact des formations géologiques riches en lignite sur les concentrations en uranium dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Sur la base de ce constat, les formations géologiques présentes au droit du secteur d'étude ont fait l'objet d'un examen approfondi.

La première étape de cet examen consiste en une revue exhaustive des formations géologiques pouvant contenir des teneurs significatives en uranium. Cette étude bibliographique s'appuie pour l'essentiel sur les cartes géologiques de la région¹⁰, sur le portail Info Terre du BRGM et sur des documents fournis par AREVA [18]. La deuxième étape identifie les formations géologiques potentiellement riches en uranium pouvant être au contact de la nappe alluviale. Lorsque ces formations sont clairement identifiées, un échantillonnage des formations *in situ* ou de formations analogues et des analyses en laboratoire permettent de vérifier la présence effective d'uranium dans ces roches. Ces prélèvements et analyses font l'objet de la troisième étape. La dernière étape de cet examen consiste à vérifier, par des analyses de laboratoire, les capacités de relargage des roches contenant naturellement des teneurs significatives en uranium.

¹⁰ Les cartes géologiques au 1/50 000 consultées sont : Bourg-St-Andéol, Orange, Pont-St-Espirit et Valréas.

3.1.1 FORMATIONS GEOLOGIQUES REGIONALES IDENTIFIEES COMME POTENTIELLEMENT RICHES EN URANIUM

3.1.1.1 Lignites du Crétacé supérieur

Le lignite est une roche sédimentaire composée de 60 à 75 % de carbone (charbon peu évolué) peu compact et constituée par l'accumulation de végétaux. Le lignite est utilisé comme combustible pour le chauffage et pour produire de l'électricité. **De par sa forte teneur en matière organique, le lignite concentre naturellement certains éléments chimiques comme l'uranium.**

Régionalement, certains faciès gréseux ou marneux du Cénomaniens, du Turonien, du Coniacien et du Santonien renferment des niveaux de lignites. Ces lignites ont été mis en évidence dans plusieurs secteurs de la Drôme, du Gard, de l'Ardèche et du Vaucluse (Figure 24).

- Cénomaniens : ces formations sont rencontrées notamment à Saint-Julien-de-Peyrolas, à Labastide-de-Virac et Saint-Paulet-de-Caisson où les lignites ont été exploités jusque vers 1960. A l'est de Saint-Just, au lieu-dit « Le Banc Rouge », les sables et argiles à lignites du Cénomaniens ont été exploités épisodiquement en galeries entre 1820 et 1950. La production annuelle était comprise entre 100 et 2000 tonnes. Le niveau riche en lignite présente une épaisseur de 0,5 à 2 mètres sous 20 à 40 mètres de recouvrements stériles ;
- Turonien : ces formations constituées en majorité de sables à lignites, de calcaires et de marnes à huîtres sont rencontrées principalement aux environs de Salavas, Colombet, Mondragon et Vagnas. Ces lignites ont été exploités en galeries sur la commune de Mondragon de 1838 à 1920 ;
- Coniacien : les affleurements réduits ne permettent pas de définir cette couche avec précision. Il est à noter que des argiles ligniteuses ont été observées dans ces formations ;
- Santonien : localisé à l'ouest de Vagnas, le Santonien est caractérisé par un environnement de dépôts sédimentaires rencontré habituellement dans les lacs, les lagunes ou les deltas de fleuves. Il comporte :
 - o des sables, des conglomérats et des pélites gréseuses avec intercalations de lignites pyriteux qui ont été exploités en galeries de 1859 à 1869 (production proche de 1800 tonnes par an). Les lignites ont également été exploités à Piolenc en galeries de 1803 à 1945 [33, 34] ;
 - o des schistes bitumineux sur une épaisseur de 2 mètres. La distillation des schistes, effectuée sur place à l'aide des lignites extraits sur la même concession, fournissait de 12 à 15% d'huiles minérales, de goudrons, de paraffine et de gaz d'éclairage.

3.1.1.2 Marnes ligniteuses de l'Eocène

Entre Saint-Privas-de-Champelos et Issirac (quart sud ouest de la Figure 24), le faciès dominant est un calcaire marno-crayeux qui présente de nombreuses intercalations argileuses à débris de végétaux dans ses extensions orientales. Vers l'ouest, les calcaires comportent des niveaux plus riches en lignites

d'une épaisseur de 1,5 à 2,75 mètres. Ces lignites ont fait l'objet d'exploitations à Barjac (ouest de la Figure 24) et près de Roméjac et Avejan, qui ont conduit à la réalisation de travaux souterrains. En 90 ans, la production cumulée est de l'ordre de 250 000 tonnes de lignites. Ses principaux débouchés sont le chauffage des magnaneries et filatures jusqu'à Pont-Saint-Esprit ainsi que les fours à chaux. Cependant, la majorité des séries productives est localisée à des profondeurs importantes (750 à 1000 mètres). Dans l'état actuel des connaissances, les réserves reconnues sont de plusieurs dizaines de millions de tonnes.

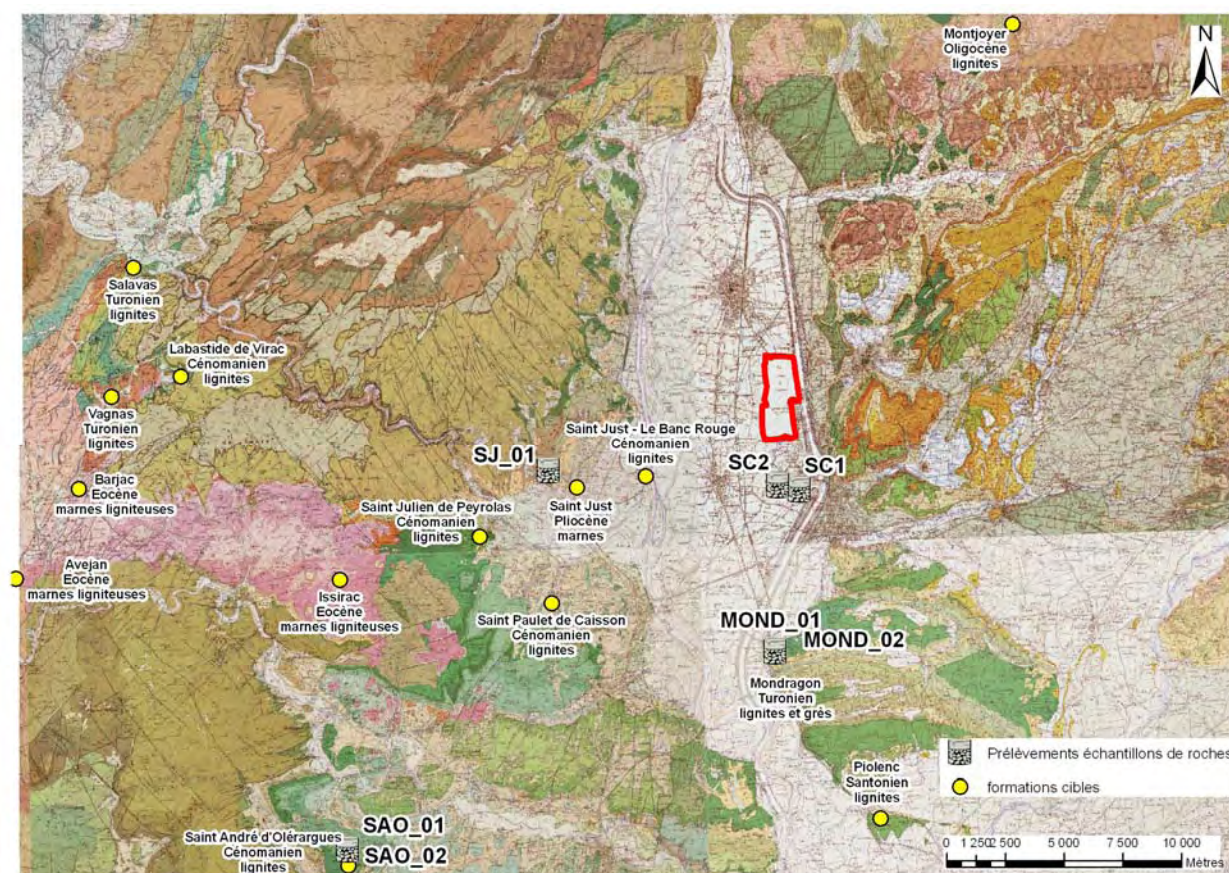


Figure 24 : Localisation des formations géologiques potentiellement riches en uranium

3.1.1.3 Lignites de l'Oligocène

La formation de l'Oligocène est principalement constituée de calcaires lacustres ou palustres d'une épaisseur maximale de 20 mètres. Une couche de lignite d'une épaisseur d'un mètre a fait l'objet de travaux d'exploitation très limités, notamment près de Montjoyer (Figure 24).

3.1.1.4 Marnes du Pliocène

Les marnes du Pliocène (déjà décrites au paragraphe 2.2), formation imperméable, constituent la base de la nappe alluviale objet de cette étude. Les séquences terminales (en partie érodées sous la nappe

alluviale) sont constituées de niveaux saumâtres lagunaires, potentiellement riches en débris végétaux. La matière organique agissant comme un piège pour l'uranium, ces formations pourraient présenter des teneurs en uranium non négligeables.

3.1.1.5 Placers¹¹ riches en minéraux lourds dans les alluvions quaternaires

Le manque d'information sur ces niveaux ne permet pas de les examiner. En effet, les placers identifiés sont peu nombreux et présentent par définition une extension géographique limitée. Il apparaît cependant peu probable que ces éventuels placers, formés généralement de minéraux lourds très peu altérables, relarguent de l'uranium et soient à l'origine des concentrations mesurées dans la nappe. Ils ne peuvent donc pas être à l'origine des concentrations en uranium observées dans une zone de plusieurs kilomètres carrés.

3.1.2 FORMATIONS POTENTIELLEMENT RICHES EN URANIUM RECONNUES AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE

Sur la base de quatre sondages réalisés par la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine (SNPA) en 1969, il est possible de déterminer les formations géologiques potentiellement riches en uranium (décrites au paragraphe 3.1.1) présentes au droit du secteur d'étude. Ces informations sont validées par 3 sondages réalisés par AREVA, dont 2 en 2009 dans le cadre de la présente étude (ET271, SC1 et SC2) notamment pour ce qui concerne les formations de surface. Les logs géologiques et techniques de ces ouvrages sont joints en *Annexe 6*. Les formations géologiques interceptées par les ouvrages SNPA sont détaillées dans un rapport du BRGM de 1973 sur la nappe alluviale du Rhône [16] et décrites ci-après.

Le sondage Petit Galap de la SNPA (19,30 m de profondeur) est représentatif des formations géologiques de l'ensemble de la vallée du Rhône, avec la succession : limons, alluvions quaternaires et marnes Plaisanciennes (Pliocène). Cette succession est également confirmée par les sondages réalisés par AREVA (ET271, SC1 et SC2). Le sondage Mirabelle de la SNPA (15 m de profondeur) montre la présence de grès à lignite du Paulétien (Cénomaniens) localisés sous les alluvions quaternaires. Le sondage du Grand Malijac de la SNPA (70 mètres de profondeur) montre un biseautage des marnes Plaisanciennes (réduites à 1,30 m) sous les alluvions. La présence de grès et sables verts du Turonien inférieur, dont certains sables verts ligniteux (30 cm d'épaisseur), est détectée à 20 mètres de profondeur. Un conglomérat de base marque la limite du Cénomaniens-Turonien. Sous ce conglomérat, le Cénomaniens typique de la région de Saint-Paulet-de-Caisson est observé ; il comprend des calcaires, des grès et calcaires à lignite du Paulétien (Cénomaniens) et des grès à Orbitolines. Le sondage Préférence de la SNPA (30 mètres de profondeur) montre la présence de grès (Turonien inférieur) sous

¹¹ Un placer alluvial est un dépôt d'alluvions présentant des concentrations naturelles élevées en minéraux lourds.

les alluvions quaternaires. Il est à noter qu'un niveau d'argile noire à lignites (12 cm d'épaisseur) est détecté à 22 mètres de profondeur.

Selon les sources bibliographiques disponibles, la localisation des sondages Petit Galap et Mirabelle de la SNPA peut être inversée. La localisation de ces sondages sur la Figure 25 est validée, d'une part par le rapport BRGM de 1973 [16], d'autre part par les logs géologiques des ouvrages AREVA.

L'analyse des logs géologiques des différents sondages (SNPA et AREVA) permet de tracer une zone d'extension présumée des formations du Crétacé sous les alluvions quaternaires. Cette zone est reprise de [29] et tracée sur la Figure 25. Pour le reste de la plaine, les alluvions reposent sur les marnes pliocènes.

La compilation des données géologiques issues des sondages de la SNPA et d'AREVA montre qu'au droit du secteur d'étude, les formations susceptibles de contenir de l'uranium sont d'âge Crétacé ou Pliocène et constituent la base de la nappe alluviale.

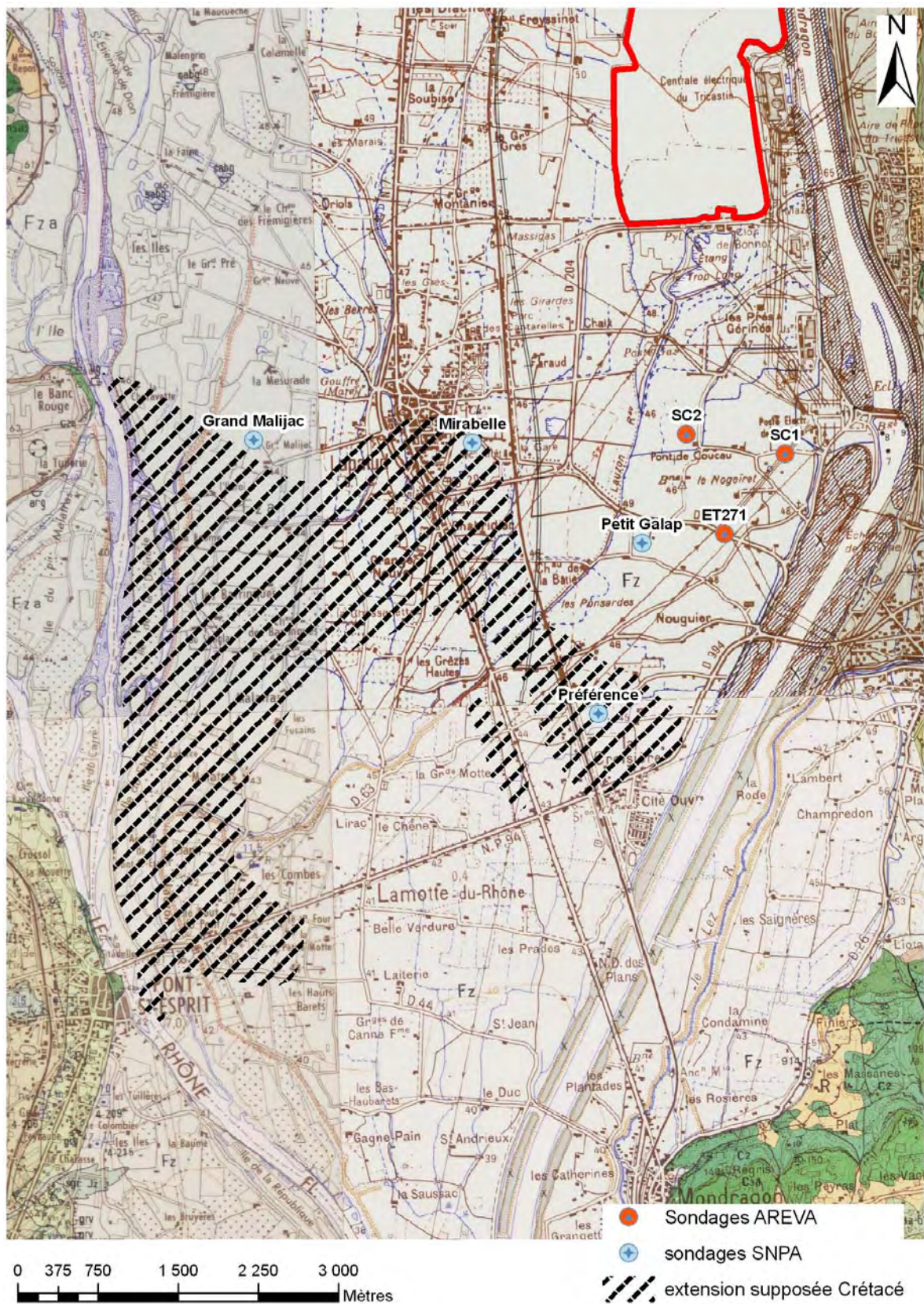


Figure 25 : Localisation des sondages de la SNPA - extension supposée des formations du Crétacé sous les alluvions.

3.1.3 DETERMINATION DES TENEURS EN URANIUM DES ECHANTILLONS SOLIDES

L'identification des formations géologiques rencontrées au droit du secteur d'étude et potentiellement riches en uranium a été suivie d'une campagne de mesures en laboratoire pour en déterminer les teneurs en uranium.

L'échantillonnage s'est orienté vers :

- les formations marneuses du Pliocène,
- les lignites du Cénomaniens,
- les grès et lignites du Turonien.

L'absence d'affleurement¹² de ces formations dans le secteur d'étude a conduit à réaliser, d'une part des prélèvements d'échantillons dans des formations analogues (IRSN, AREVA), d'autre part des prélèvements d'échantillons dans les carottes des sondages SC1 et SC2 (AREVA).

3.1.3.1 Prélèvements dans des formations analogues

La recherche de formations analogues a conduit à la réalisation de prélèvements sur les communes de Saint-Just dans les marnes bleues du Pliocène (échantillon SJ_01), Saint-André-D'Olérargues pour les lignites du Cénomaniens (SAO_01 et SAO_02) et Mondragon dans les grès (MOND_02) et lignites du Turonien (MOND_01). La localisation des points de prélèvements est visible sur la Figure 24 et les photos des lieux de prélèvement sont reprises dans l'*Annexe 7*.

Les analyses par dissolution (norme NF ISO 11466¹³) des échantillons solides ont permis de déterminer les teneurs en uranium des différentes roches. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 et comparés à titre indicatif à des valeurs obtenues par fluorescence X *in situ* (XRF) lors des prélèvements réalisés par AREVA (Tableau 4).

¹² En géologie, un affleurement désigne une roche mise à nu par l'érosion et accessible directement sans faire appel à des techniques de creusement, d'excavation ou de forage.

¹³ Minéralisation validée pour l'extraction de l'uranium dans des échantillons de tourbe par minéralisation avec de l'acide fluorhydrique.

Tableau 3 : Résultats des analyses par ICP-MS des teneurs en uranium après dissolution des échantillons solides

Nom échantillon	Type échantillon	Mesures laboratoire			
		IRSN		AREVA	
		uranium (mg/kg)	incertitude	uranium (mg/kg)	incertitude
200905554001	Lignite du Cénomanién			356	35,6
SAO-01	Lignite du Cénomanién	227	23		
SAO-02	Lignite du Cénomanién	77	8		
MOND-01	Lignite du Turonien	2,39	0,24		
MOND-02	Grès du Turonien	3,99	0,4		
SJ-01	Marne du Pliocène	0,93	0,09		

Tableau 4 : Résultats des mesures XRF in situ réalisées par AREVA

Type d'échantillon	uranium (mg/kg)
Conglomérats verdis du Miocène	60
Grès du Turonien	110
Lignites du Turonien	50
Lignites du Cénomanién	40 à 350

Il ressort de ces analyses que les plus fortes concentrations d'uranium sont observées dans les échantillons de lignites du Cénomanién. Cependant, il existe une forte variabilité des teneurs suivant les échantillons considérés. Ainsi, pour des prélèvements distants de 20 mètres (SAO-01 et SAO-02), les teneurs varient de 77 mg/kg à 227 mg/kg et jusqu'à 356 mg/kg pour l'échantillon prélevé par AREVA sur le même affleurement.

Pour ce qui concerne les autres formations, les teneurs en uranium sont proches du bruit de fond géochimique (1 à 4 mg/kg).

3.1.3.2 Prélèvements in situ

En novembre 2009, AREVA [35] a réalisé deux sondages carottés (SC1 et SC2) au sud du site nucléaire du Tricastin et en amont hydraulique de la zone 1. La localisation des sondages est reportée sur la Figure 24. Les teneurs en uranium dans les différents niveaux géologiques de l'aquifère sont reportées dans le Tableau 5. Entre 3,5 et 11 mètres, il n'a pas été possible de récupérer des échantillons ce qui n'a pas permis l'analyse des teneurs en uranium dans cette gamme de profondeur.

Tableau 5 : Résultats des analyses de sols

Sondage	Type de formations	Profondeur (m)	Teneur en U (mg/kg)	Incertitude (mg/kg)
SC2	Limons	0,7	1,4	0,14
	Limons	1,4	1,8	0,18
	Limons	2,1	1,5	0,15
	Limons	2,8	1,3	0,13
	Limons	3,5	1,5	0,15
	Marnes bleues	11	11	1,1

Il ressort de ces analyses que les formations situées au-dessus et au-dessous de l'aquifère de la nappe du Tricastin présentent, dans les forages réalisés, des teneurs faibles en uranium, sans commune mesure avec celles mesurées dans les niveaux à lignites du crétacé.

3.1.4 DETERMINATION DU POTENTIEL DE RELARGAGE DE L'URANIUM A PARTIR DES ROCHES

Après avoir identifié les formations géologiques qui présentent des teneurs élevées en uranium et qui peuvent être potentiellement rencontrées au droit du secteur d'étude, la démarche a consisté à évaluer les possibilités de relargage d'uranium à partir de ces formations, c'est-à-dire le passage d'uranium depuis ces formations dans l'eau de la nappe.

Dans un premier temps, des mesures ont été réalisées dans des eaux de nappes localisées dans des formations identifiées comme riches en lignite, à Aigaliers (Gard) et à Piolenc (Vaucluse). Les résultats sont les suivants :

- Aigaliers : 96 ± 5 mg/kg d'uranium dans les lignites du Cénomaniens ; 10 à 12 µg/L d'uranium dans les eaux de nappe (mesures IRSN) ;
- Piolenc : 20 à 40 mg/kg d'uranium dans les lignites ; 15 à 32 µg/L d'uranium dans les eaux de nappe en aval de la mine (mesures AREVA).

Dans un second temps et afin de quantifier le relargage de formations riches en uranium, des tests de lixiviation ont été effectués par l'IRSN sur les échantillons de lignites les plus riches en uranium (SAO-01 et SAO-02). Pour cela, une fraction des échantillons est mise en contact avec de l'eau Milli-Q¹⁴ dans des flacons hermétiquement fermés puis agités (test en batch). Après des temps de contact déterminés à l'avance, la fraction liquide est prélevée et analysée par ICP-MS. La concentration en uranium dans

¹⁴ L'eau Milli-Q est une eau ultra pure produit par un système de filtration et osmose inverse.

l'éluat¹⁵ permet de définir un pourcentage de relargage au cours du temps. Afin de se rapprocher des conditions du milieu naturel, des batchs ont été réalisés avec de l'eau de la nappe du Tricastin en remplacement de l'eau Milli-Q.

Tableau 6 : Résultats des tests de lixiviation par batchs sur échantillons de lignites

granulométrie	Echantillon	²³⁸ U	
		% relargage	Incertitude relative (%)
< 200 µm	SAO-01 eau de site-24h	6,4	0,70
	SAO-02 eau de site-24h	7,4	0,80
	SAO-01 eau Milli Q-24h	6,4	0,70
	SAO-01 eau de site-15j	4,2	0,50
	SAO-02 eau de site-15j	4,7	0,50
	SAO-01 eau Milli Q-15j	4,22	0,43
	SAO-01 eau de site-30j	3,71	0,38
	SAO-02 eau de site-30j	3,96	0,42
	SAO-01 eau Milli-Q-30j	3,62	0,36
< 2 mm	SAO-01 eau de site-24h	8,1	0,90
	SAO-02 eau de site-24h	7,2	0,80
	SAO-01 eau de site-15j	4,7	0,50
	SAO-02 eau de site-15j	3,44	0,39
	SAO-01 eau de site-30j	3,83	0,40
	SAO-02 eau de site-30j	2,99	0,30

Les résultats obtenus (Tableau 6) avec de l'eau de nappe et de l'eau Milli-Q sont comparables ; l'influence de la physico-chimie de l'eau est donc négligeable. La représentation synthétique de l'évolution du relargage de l'uranium des lignites dans la solution pour les différents temps de contact (Figure 26) montre un relargage significatif dès les premières heures de contact, puis une probable re-précipitation de l'uranium au cours du temps, conséquence d'un changement des conditions de stabilité. **Après 30 jours de contact, le pourcentage d'uranium en solution relargué par les lignites semble se stabiliser autour de 3%, ce qui indique que ces formations sont susceptibles de relarguer leur uranium dans l'eau.**

Les concentrations en uranium dans l'éluat varient de 300 à 1500 µg/L en fonction de la concentration initiale en uranium dans l'échantillon solide et du temps de contact. Il est à noter que les tests de lixiviation par batchs mettent en contact les roches avec un même volume d'eau (20 ml) alors que dans un milieu naturel (tel qu'un aquifère alluvial par exemple), l'eau est en constant renouvellement. L'influence du broyage sur le taux de relargage n'a pas pu être mise en évidence.

¹⁵ Solution contenant les éléments chimiques relâchés par la fraction solide.

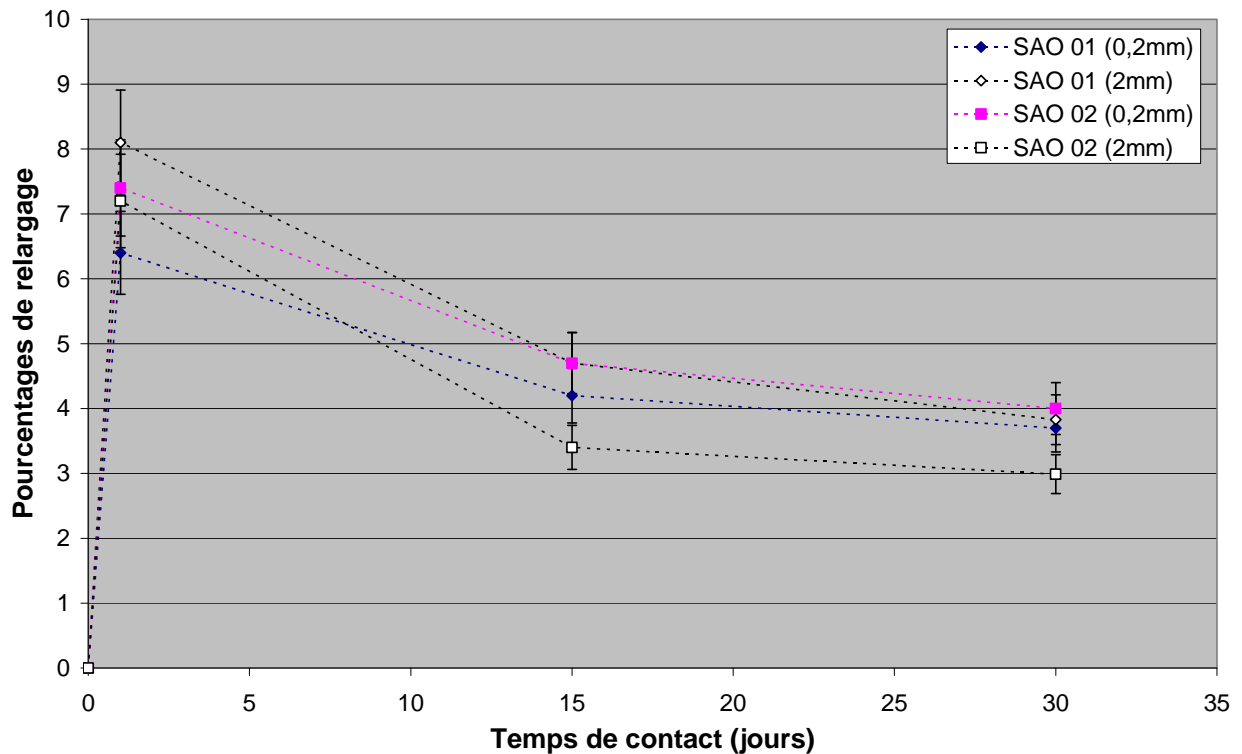


Figure 26 : Evolution des taux de relargage pour différents temps de contact

3.1.5 SYNTHÈSE SUR L'HYPOTHÈSE GÉOLOGIQUE

L'examen des formations géologiques locales indique que plusieurs couches de roches présentent des teneurs naturelles en uranium relativement élevées. En particulier, il existe régionalement des niveaux géologiques contenant des lignites qui présentent des teneurs en uranium relativement importantes. C'est le cas des lignites du crétacé qui présentent des teneurs de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mg d'uranium par kg.

Par ailleurs, des mesures effectuées dans l'eau de nappes situées à proximité des zones d'exploitation de ces lignites ont montré des teneurs en uranium comprises entre 10 et 12 $\mu\text{g/L}$ (zone d'Aigaliers, Gard) et 15 et 32 $\mu\text{g/L}$ (zone de Piolenc). Des études en laboratoire ont confirmé que ces formations sont susceptibles de libérer des quantités d'uranium significatives dans les eaux souterraines.

Au niveau de la zone d'étude, les seules formations susceptibles de relarguer de manière significative de l'uranium sont les formations du crétacé qui constituent, localement, le substratum imperméable de la nappe alluviale. L'analyse de la cartographie de ce contact entre les formations du crétacé et les alluvions quaternaires ainsi que celle des quelques sondages passés et récents, conduisent l'IRSN aux conclusions suivantes :

- 1) Il n'existe pas, en l'état actuel des connaissances, d'éléments probants permettant d'expliquer les teneurs élevées d'uranium observées dans la zone 1 par une origine géologique. En effet, aucune formation géologique susceptible de relarguer de manière significative de l'uranium n'a été identifiée dans cette zone et en amont hydraulique de cette zone.
- 2) La zone 2 est par contre localisée au droit d'un contact supposé entre les alluvions contenant la nappe et des formations du crétacé possiblement riches en uranium. Dans cette zone, les teneurs en uranium observées pourraient donc être expliquées par le relargage d'uranium à partir de ces formations géologiques qui constituent la base de la nappe alluviale.

3.2 2^{EME} HYPOTHESE : URANIUM PROVENANT D'ACTIVITES ANTHROPIQUES AUTRES QUE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

L'hypothèse d'uranium provenant d'activités anthropiques autres que celles mises en œuvre sur le site nucléaire du Tricastin a ensuite été explorée. Pour cela, plusieurs actions ont été menées :

- l'identification et la localisation d'activités industrielles passées ou récentes ayant mis ou mettant en œuvre de l'uranium dans la zone d'étude ;
- l'analyse de données historiques concernant l'utilisation des lignites à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle ;
- l'examen de l'influence de l'apport d'engrais phosphatés.

3.2.1 DONNEES DISPONIBLES SUR LES SITES INDUSTRIELS

Certaines activités industrielles telles que la production de céramiques réfractaires, la combustion de charbon dans des centrales thermiques ou encore le traitement de minerais d'étain, d'aluminium, etc. mettent en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides (chaînes de l'uranium et du thorium). La manipulation et la transformation de ces matières qualifiées de « NORM ¹⁶ » peuvent entraîner une augmentation notable des teneurs en radionucléides dans l'environnement [36]. Cette situation a été prise en compte dans la réglementation française, notamment par l'arrêté du 25 mai 2005 relatif aux activités professionnelles mettant en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives¹⁷ (Figure 27).

¹⁶ Naturally Occurring Radioactive Material.

¹⁷ Radioactivité : propriété de certains éléments dont les noyaux se désintègrent spontanément pour former d'autres éléments en émettant des rayonnements ionisants.

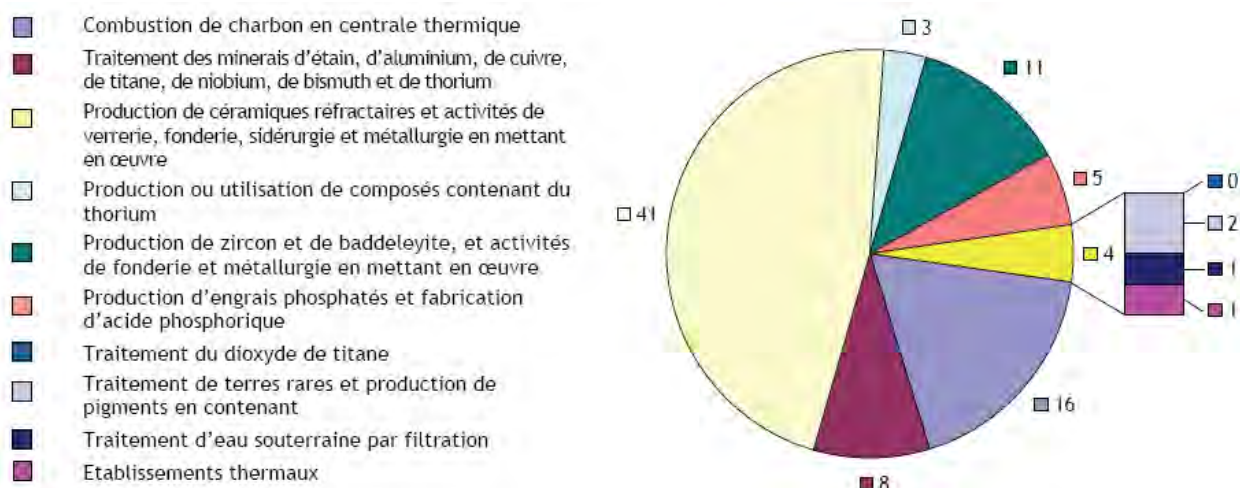


Figure 27 : Catégories d'activités professionnelles mettant en œuvre des produits présentant une radioactivité naturelle et désignées par l'arrêté du 25 mai 2005 - répartition de 79 études reçues par l'IRSN [36] par secteurs d'activité

Par ailleurs, la réalisation d'Inventaires Historiques Régionaux (IHR) des sites industriels et activités de services, en activité ou non, s'est accompagnée de la création d'une base de données nationale : BASIAS¹⁸ (arrêté du 10 décembre 1998). L'un des principaux objectifs de ces inventaires est de recenser de façon large et systématique, tous les sites industriels, abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement.

Dans le cadre de la présente étude, la recherche des entreprises dont les activités auraient pu provoquer une pollution des sols et de la nappe des alluvions par des radionucléides s'est appuyée, d'une part sur la base de données BASIAS, d'autre part sur les activités listées dans le rapport [36]. La compilation de ces données (Figure 28) montre que les principaux sites industriels mettant en œuvre des radionucléides sont localisés à Lapalud, Bollène-La-Croisière et dans la zone industrielle au sud du site nucléaire entre les plans d'eau « Trop Long », « Bartras » et le CCRD. Pour cette dernière zone, il est à noter que les sites, sièges des anciennes activités en liaison avec le cycle du combustible (TRIADE), ont fait l'objet d'un diagnostic environnemental [37] qui n'a révélé aucun marquage des sols ou de la nappe par de l'uranium.

En conclusion, il n'est pas possible d'établir de relation entre les teneurs élevées en uranium observées dans la nappe alluviale du Tricastin et la présence d'activités industrielles passées ou actuelles mettant en œuvre des radionucléides, à l'exception éventuelle de celles situées dans le secteur de Bollène-La Croisière, au sud de la zone 1.

¹⁸ Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Services du Ministère de l'Environnement.

3.2.2 UTILISATION DE CENDRES, DE MACHEFERS ET D'ENGRAIS

Comme il a été indiqué dans les sections précédentes, le secteur du Tricastin se caractérise par la présence de plusieurs formations géologiques riches en lignite. De la fin du XIX^{ème} au début du XX^{ème} siècle, ces lignites, exploités notamment à Mondragon-Bollène, Saint-Paulet-de-Caisson et Barjac ont été utilisés comme combustible dans les différents fours industriels conçus à partir de 1840 [38, 39]. La quantité de lignites brûlés pendant plus d'un siècle d'utilisation dans les usines a entraîné la production de cendres et de mâchefers dont le devenir n'est pas clairement établi : remblaiement de routes, éléments de maçonnerie (mâchefers) et amendement (cendres). Certains de ces mâchefers ont été retrouvés à proximité de Bollène et des études de lixiviation effectuées par AREVA sur ces matériaux (Tableau 7) ont mis en évidence la possibilité d'un relargage d'uranium.

Tableau 7 : Résultats du test de lixiviation réalisé par AREVA sur un échantillon de mâchefers

Nom de l'échantillon	Type d'échantillon	Teneur en uranium dans la roche (mg/kg)	Concentration en uranium dans l'éluat (µg/L)
ETUDE 9514-10-GEOSCIENCES DEX	Mâchefer	85	101

Par ailleurs, les apports d'engrais phosphatés peuvent être à l'origine d'un apport d'uranium. La teneur en uranium des engrais phosphatés naturels peut en effet varier de 60 à 84 mg/kg. La traçabilité des amendements passés est cependant impossible à établir dans le secteur d'étude.

Les quelques analyses en uranium des terrains superficiels qui ont été effectuées dans la zone 1 (Cf. § 3.1.3.2) ne montrent cependant aucun excès d'uranium dans le sous-sol. Dans ces conditions, il n'existe, en l'état actuel des connaissances, aucun élément permettant d'étayer l'hypothèse d'une origine des teneurs élevées en uranium observées dans la nappe du Tricastin en relation avec l'épandage de résidus de combustion de lignites ou d'engrais phosphatés.

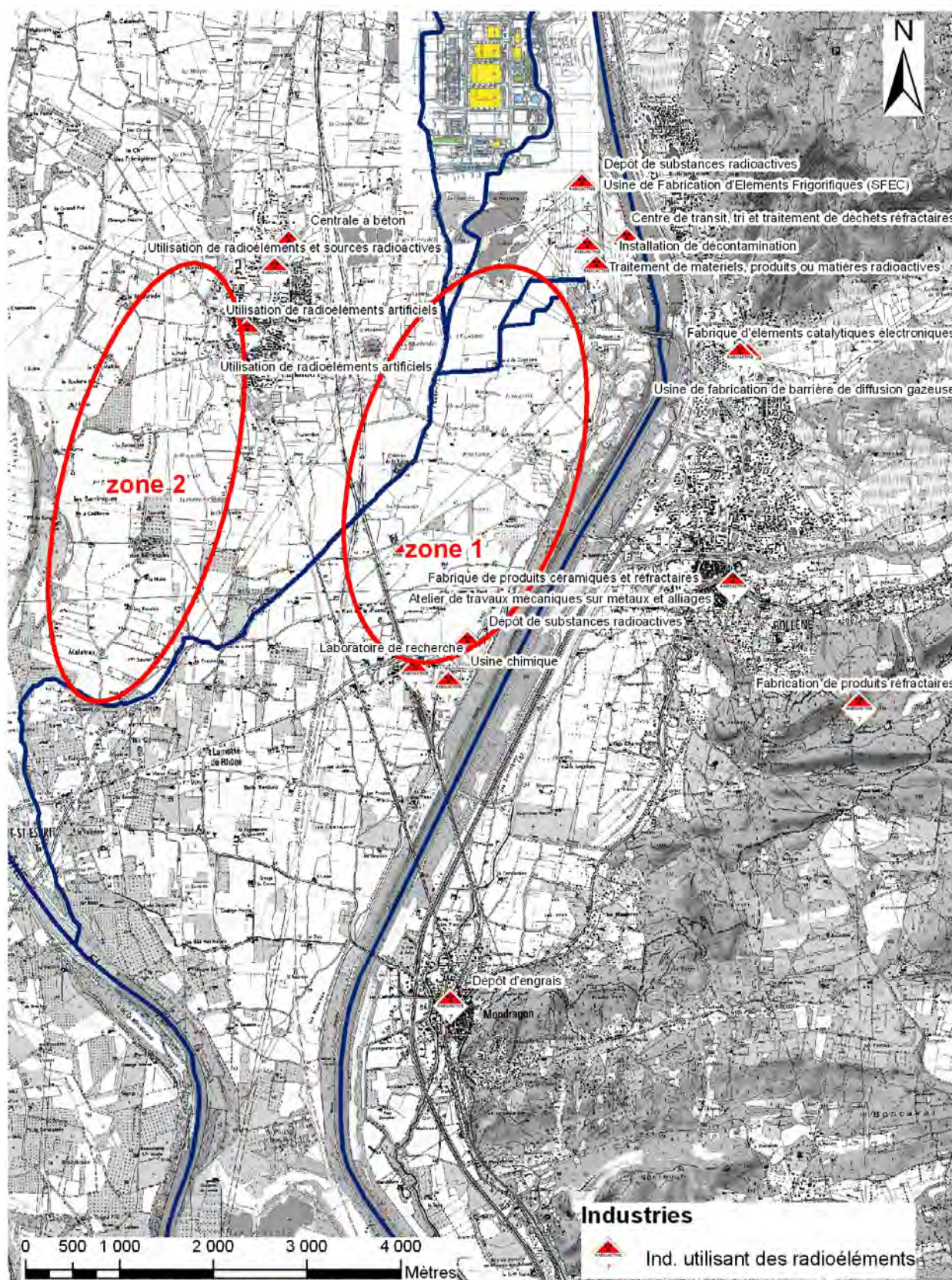


Figure 28 : Localisation des industries susceptibles de mettre en œuvre des radionucléides

3.2.3 SYNTHÈSE SUR L'HYPOTHÈSE D'UNE ORIGINE INDUSTRIELLE AUTRE QUE LE SITE NUCLEAIRE

La consultation de la base BASIAS (Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service) du ministère de l'écologie a permis de localiser, dans la plaine du Tricastin, plusieurs sites industriels mettant, ou ayant mis, en œuvre des matériaux contenant naturellement des radionucléides. A l'exception du secteur de Bollène-la-Croisière (extrême sud de la zone 1), l'étude n'a pas montré de possibilité d'établir une relation entre ces activités industrielles et les concentrations élevées en uranium observées dans la nappe. Cette hypothèse ne peut donc pas, en l'état actuel des connaissances, être retenue pour expliquer la présence d'uranium dans les zones 1 et 2.

Par ailleurs, en l'état actuel des connaissances, aucun élément ne permet d'étayer l'hypothèse d'une origine des teneurs élevées en uranium observées dans la nappe du Tricastin en relation avec l'épandage de résidus de combustion de lignites ou d'engrais phosphatés.

3.3 3^{EME} HYPOTHÈSE : URANIUM PROVENANT DE REJETS DU SITE NUCLEAIRE DU TRICASTIN

Les installations nucléaires du site du Tricastin mettent en œuvre une grande quantité d'uranium sous des formes physiques et chimiques très variées. Afin d'examiner l'éventuelle implication de ces activités nucléaires dans le marquage en uranium de la nappe alluviale dans la partie sud de la plaine (zones 1 et 2 définies au § 2.6.6), l'étude a porté, d'une part sur les activités actuelles et passées du site nucléaire, d'autre part sur la possibilité d'un cheminement de l'uranium depuis le site nucléaire jusqu'aux zones 1 et 2.

Les activités actuelles et passées du site nucléaire sont présentées en premier lieu, en examinant notamment les voies de rejets d'uranium dans l'environnement. Les concentrations en uranium dans la nappe alluviale sur le site nucléaire et en aval immédiat de ses exutoires font l'objet de la deuxième partie. Compte tenu d'un déplacement relativement lent de l'uranium dans la nappe alluviale (quelques mètres à quelques dizaines de mètres par an - voir § 2.4.2), les données recueillies concernent à la fois le présent et les périodes plus anciennes.

Après la définition des sources d'uranium au niveau du site nucléaire, la possibilité d'un cheminement entre le site et les zones 1 et 2 est étudiée dans la troisième partie, en utilisant des traceurs. Un traceur est un élément chimique ou une composition isotopique particulière de l'uranium qui, s'ils sont identifiés à la fois sur le site et dans les zones 1 et 2, attesteront sans ambiguïté d'une influence du site sur ces zones.

La quatrième partie présente l'étude des chemins envisageables entre le site et les zones 1 et 2. Cette étude s'appuie sur l'examen des relations entre les cours d'eau et la nappe alluviale ainsi que sur des modélisations hydrogéologiques.

3.3.1 PRINCIPALES ACTIVITES ACTUELLES ET PASSES SUR LE SITE NUCLEAIRE DU TRICASTIN

Le site nucléaire du Tricastin est un complexe industriel qui regroupe des installations du cycle du combustible nucléaire (activités liées à la fabrication du combustible nucléaire) et une centrale nucléaire (CNPE). Il représente la plus importante concentration d'industries nucléaires et chimiques de France (Figure 29). Outre le CNPE, ce site comporte principalement :

- le Centre d'études de la vallée du Rhône (CEA/VALRHO) dont la vocation est la recherche dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium ;
- une installation nucléaire de base classée secrète (INBS) exploitée par AREVA-NC et mettant et ayant mis en œuvre de l'uranium enrichi à toutes les teneurs en isotope 235 ;
- l'usine COMURHEX qui assure la conversion du tétrafluorure d'uranium (UF_4) en hexafluorure d'uranium (UF_6) ainsi que des activités en lien avec la chimie du fluor. Les principaux éléments utilisés par cette usine sont l'uranium (^{235}U et ^{238}U) et le fluor. Il est à noter que, à l'exception de l'INB qui traitait des matières uranifères enrichies jusqu'à 2,25 % en ^{235}U et qui est à l'arrêt depuis 2007, tous les ateliers de cette usine ont un statut d'installation Classée pour la Protection de l'Environnement ;
- l'usine d'EURODIF qui réalise l'enrichissement isotopique de l'uranium destiné à la fabrication de combustible pour centrales à eau légères. Les principaux éléments chimiques et radiologiques mis en œuvre sont l'uranium d'origine naturelle (^{238}U et ^{235}U), le fluor et le bore (poison neutronique). Depuis la mise en service de l'installation, la proportion d'uranium 235 après enrichissement n'a jamais dépassé les 5 % ;
- des installations de la Société Franco-Belge de Fabrication des Combustibles (FBFC, appartenant à AREVA NP), qui fabriquait des assemblages combustibles pour réacteurs à eau légère. Depuis la cessation de cette activité, qui a conduit au démantèlement et au déclassé des bâtiments, cette installation n'assure plus que des fabrications et de l'entreposage de pièces mécaniques destinées à la fabrication d'éléments combustibles ;
- de l'installation W-TU5, exploitée par AREVA NC, qui assure la défluoration de l'uranium appauvri provenant d'EURODIF (W, statut d'ICPE, principales matières mise en œuvre : UF_6 appauvri et fluor) et la conversion de nitrate d'uranyle de retraitement provenant d'AREVA NC La Hague (TU5, statut INB, principales matières mises en œuvre : nitrate d'uranyle et URT avec une teneur en ^{235}U de l'ordre de 1 %) ;
- de l'usine SOCATRI, filiale d'EURODIF, dont les activités concernent la maintenance, la décontamination radioactive, le démantèlement de pièces ou d'équipements, le traitement de déchets et d'effluents (mise en œuvre de solutions uranifères). Il est à noter que cette installation, qui est une INB au titre de son activité d'assainissement et de récupération d'uranium, avait également une activité de traitement de surface, sous le régime d'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, à l'origine de la pollution de la nappe par le chrome VI et le nickel ;

- de la Base Chaude Opérationnelle du Tricastin (BCOT) qui est destinée à des opérations de maintenance et d'entreposage de matériels et d'outillages provenant de réacteurs nucléaires à eau sous pression, à l'exclusion d'éléments combustibles.

Il existe par ailleurs au sein de l'INBS des entreposages anciens de déchets. Ceux-ci sont localisés :

- dans la « butte de stockage » au nord de l'installation COMURHEX. Dans cette butte, ont été placés 760 tonnes de barrières de diffusion gazeuse contenant quelques tonnes d'uranium, des déchets constitués de filtres de conditionnement renfermant des traces d'uranium (moins de 1 kg), des fluorines (14 000 m³) et 55 m³ de boues (contenant du chrome trivalent),
- dans des silos situés dans la partie nord du site ; 263 m³ de gravats provenant du pilote d'enrichissement chimique de l'uranium (CHEMEX) y sont entreposés.

Les principaux radionucléides susceptibles d'être présents dans les effluents liquides ou gazeux rejetés, du fait de leur manipulation dans les installations dans les conditions normales de fonctionnement, sont :

- l'uranium naturel, l'uranium provenant du traitement de combustibles usés (URT), l'uranium appauvri et l'uranium enrichi en isotope 235 à toutes les teneurs,
- des transuraniens (émetteurs alpha),
- des produits de fission (émetteurs β, γ),
- du tritium,
- du carbone 14,
- des produits d'activation.

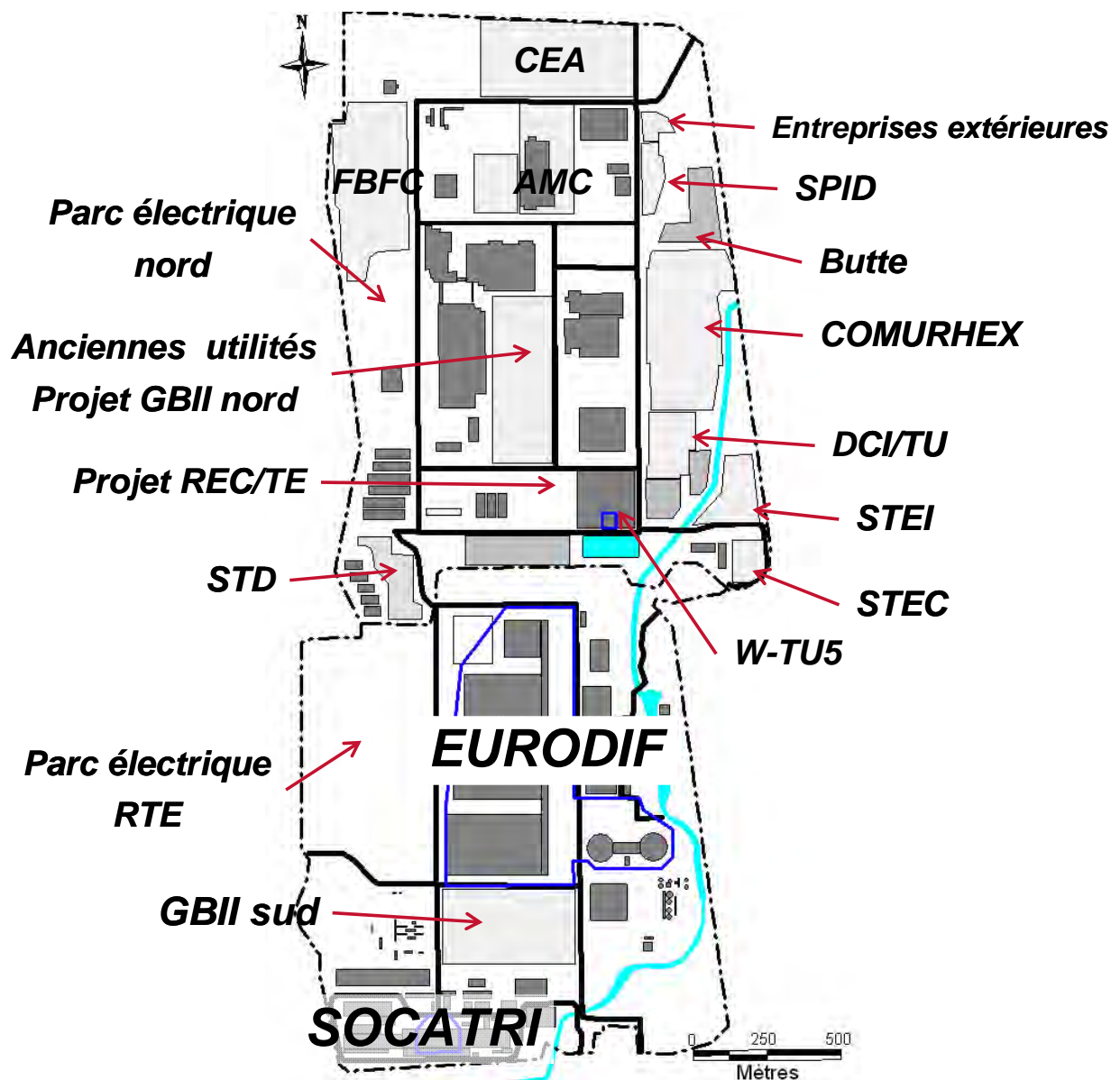


Figure 29 : Localisation des principales installations du site nucléaire du Tricastin

De par leurs activités, les installations du site nucléaire sont autorisées, par arrêtés interministériels, à rejeter des effluents chimiques et radioactifs dans l'atmosphère (gazeux) ou dans le canal de Donzère-Mondragon (liquides).

La réglementation applicable en matière de seuils de référence concernant les rejets radioactifs ou chimiques est constituée des arrêtés départementaux suivants :

- de 1966 à 2005 : arrêté préfectoral n° 2542 du 24 juin 1966 ;
- de 2005 à 2008 : arrêté ministériel du 22 août 2005 ;
- depuis 2008 : arrêté ministériel du 16 avril 2008.

Les rejets autorisés sont effectués dans des conditions contrôlées et leur impact sur l'environnement fait l'objet d'une surveillance réglementaire réalisée par les exploitants nucléaires, grâce à des mesures dans l'air, le sol et dans les eaux. La localisation des exutoires des rejets liquides (canal de Donzère-Mondragon) rend très improbable l'hypothèse que ces rejets autorisés puissent être à l'origine d'un marquage de la nappe du Tricastin dans les zones 1 et 2. Par contre, les rejets accidentels qui ont affecté la nappe alluviale au droit du site ont pu et peuvent conduire à un transfert d'uranium dans la nappe et dans la Gaffière, qui toutes deux s'écoulent globalement vers le sud de la plaine. Ces éléments conduisent donc à porter un intérêt particulier aux rejets accidentels d'uranium dans le sol et la nappe.

Les éléments précédents complètent et rectifient les données fournies en 2008 par l'IRSN dans son rapport pour le Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sûreté Nucléaire (HCTISN) [40] sur l'état de la surveillance environnementale des nappes phréatiques et des cours d'eau autour des sites nucléaires. Ce rapport montre que les principaux incidents ayant pu conduire à des contaminations de la nappe alluviale sous le site nucléaire du Tricastin sont assez bien identifiées dans l'ensemble. Ils ont principalement concerné l'INBS AREVA NC, COMHUREX, EURODIF et SOCATRI. On trouvera en *Annexe 8* la fiche descriptive du site nucléaire du Tricastin issue du rapport de l'IRSN pour le HCTISN [40] qui recense les principaux incidents ayant conduit à des rejets dans l'environnement. Il faut cependant noter que certains incidents, en particulier concernant les ICPE, ont pu se produire sans avoir été portés à la connaissance de l'IRSN.

3.3.2 L'URANIUM DANS LA NAPPE AU DROIT DU SITE NUCLEAIRE

Afin de caractériser les sources d'uranium présentes sur le site nucléaire qui pourraient avoir un impact sur la nappe dans la plaine du Tricastin, l'étude a comporté une détermination des concentrations en uranium dans la nappe au droit du site. Dans le cadre de la surveillance environnementale du site nucléaire, AREVA réalise périodiquement des mesures de la teneur en uranium sur des échantillons d'eau prélevés dans la nappe alluviale et dans la Gaffière. Les mesures réglementaires effectuées sous la responsabilité des exploitants sont, depuis quelques années faites par des laboratoires agréés par l'ASN. Cette surveillance environnementale permet de constituer des chroniques des concentrations en de nombreux points de la nappe et de la Gaffière au droit du site. La caractérisation des concentrations en uranium dans la nappe au droit du site s'est appuyée sur ces données et sur une campagne de mesures spécifiques (juin 2009). La situation actuelle est d'abord présentée, avant d'aborder des situations anciennes correspondant à des pollutions importantes.

3.3.2.1 Situation actuelle

La situation actuelle a été récemment étudiée par AREVA dans le cadre d'un état des lieux radiologique et chimique des sols et des eaux de la nappe au droit du site. Cet état des lieux, débuté

en 1998, couvre un nombre de points de prélèvement et de paramètres mesurés beaucoup plus important que la surveillance périodique. Les conclusions de ce travail ont été présentées par AREVA lors de la CIGEET du 21 novembre 2008.

En complément des données fournies par AREVA, l'IRSN, le LDA26 et AREVA ont procédé en juin 2009 à des prélèvements et analyses contradictoires dans 16 piézomètres du site nucléaire choisis par l'IRSN. Cette campagne visait en particulier à vérifier la pertinence des résultats présentés par AREVA. Les mesures ont porté sur l'uranium et sur d'autres éléments chimiques. Les points de prélèvement ont été choisis en fonction de leur proximité avec des zones dans lesquelles des pollutions sont connues et avec les limites du site :

- ET1 : localisé au nord du site nucléaire donc hors influence du site,
- PZAN3 : situé en aval immédiat des pilotes CEA,
- N5 : localisé à proximité du pompage de la pisciculture qui utilise l'eau de la nappe ;
- ET201 et ET203 : situés en aval de la « butte de stockage »,
- ET212 : localisé à l'Est du site de COMURHEX à proximité de la Gaffière,
- N1 bis : localisé à l'ouest du site nucléaire,
- ET11 : piézomètre localisé en rive gauche de la Gaffière,
- ET226 : localisé à l'ouest du site nucléaire et en aval immédiat des parcs d'entreposage et des Stations de Traitement des Déchets,
- ET269 : situé à l'est d'EURODIF et proche d'une zone contaminée par des solvants,
- ET32 : localisé en aval immédiat d'EURODIF, dans une zone contaminée par du bore,
- ET27, ET38, ET19 et ET41 : localisés à proximité ou au droit de SOCATRI, dans une zone contaminée par du chrome VI, du nickel et de l'uranium,
- ET8 : localisé en aval du site nucléaire et en rive gauche de la Gaffière.

Une carte de localisation des piézomètres sur le site nucléaire et les résultats des mesures de l'uranium sont présentés sur la Figure 30.

Les analyses contradictoires réalisées par l'IRSN, le LDA26 et AREVA ont montré des résultats concordants (*Annexe 9*) avec ceux présentés par AREVA lors de la CIGEET du 21 novembre 2008.

Actuellement, les piézomètres présentant les plus fortes concentrations en uranium sont situés au nord-est du site nucléaire : PZAN3, ET212 et ET11 (respectivement 38, 25 et 41 µg/L). Le long des bordures ouest et sud du site, les concentrations sont faibles (inférieures à 5 µg/L), à l'exception du point ET 27 (entre 10 et 15 µg/L). Ce dernier correspond à un pompage implanté à proximité immédiate de l'installation défectueuse lors de l'incident SOCATRI de 2008 et sert à collecter l'uranium rejeté dans la nappe.

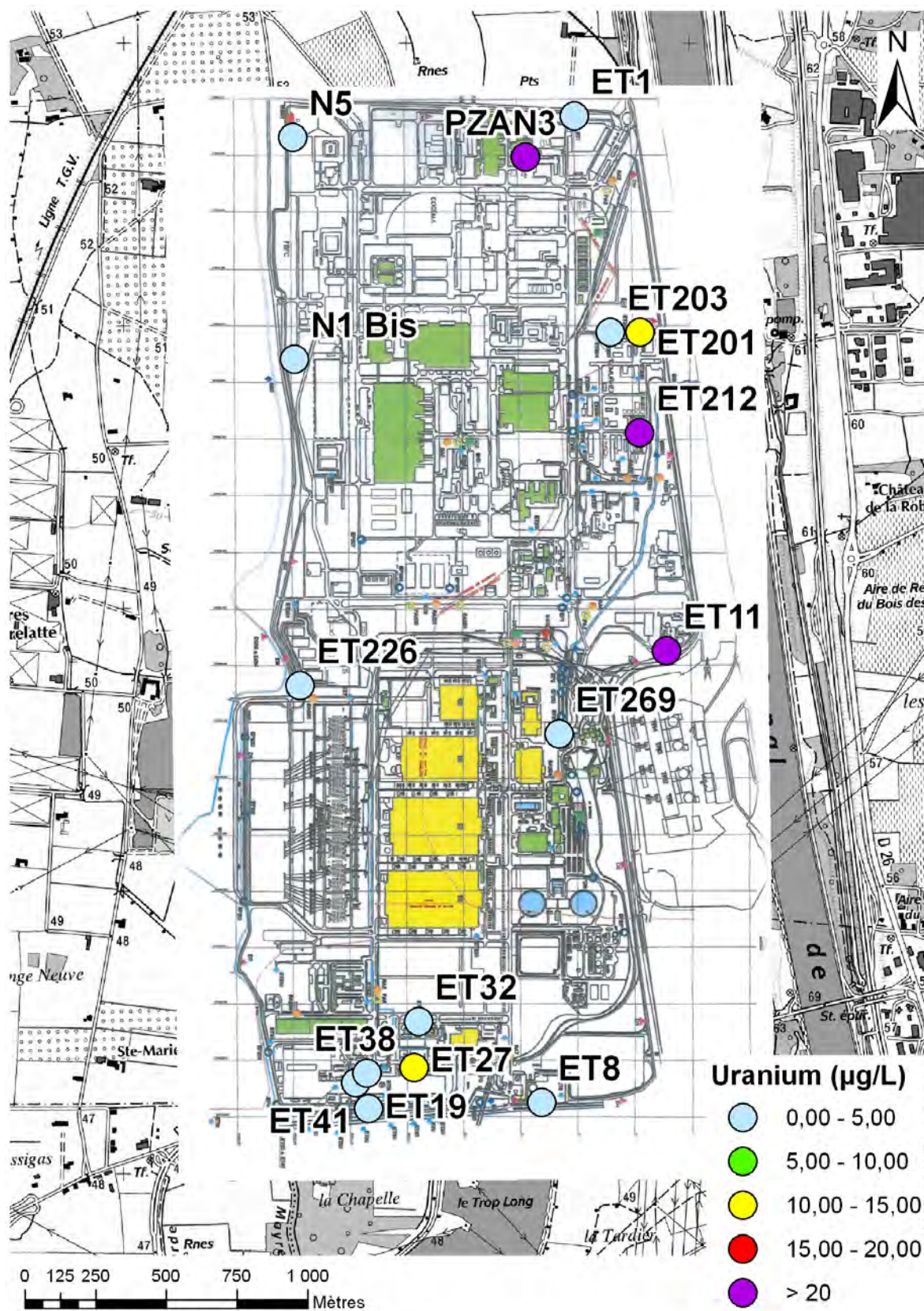


Figure 30 : Concentrations en uranium dans les eaux prélevées dans les piézomètres du site nucléaire retenus pour les analyses contradictoires

3.3.2.2 Situations anciennes

De manière générale, il existe peu de données facilement accessibles permettant de suivre, en un même point du site, l'évolution de la teneur en uranium et de sa composition isotopique au cours des quarante dernières années. La plupart des données disponibles proviennent des rapports « Guillaumont » [41] et « KREBS » [42]. Ces rapports, qui dressent un état des lieux de l'état radiologique et chimique des sites d'INBS, mentionnent que, à la suite de la détection d'uranium (1500 µg/L) dans le puits P2 localisé sur le site de COMURHEX en décembre 1976, des analyses complémentaires (décembre 1976 - février 1977 puis en 1979) ont été réalisées à la fois sur le site de COMURHEX et sur les piézomètres localisés en aval de la « butte de stockage ». Les résultats disponibles ainsi que la localisation des piézomètres sont présentés dans l'*Annexe 12*. Ils montrent qu'au cours de la période 1976-1979, les concentrations en uranium mesurées au droit du site COMURHEX variaient de 100 µg/L à 1000 µg/L pour dépasser localement les 5000 µg/L. Des dispositions correctives ont été mises en place et notamment des pompages de la nappe, dont les eaux ont été rejetées dans le canal de Donzère-Mondragon, ont été mis en œuvre en 1980. Elles ont permis de contenir la pollution, entraînant une diminution des concentrations en uranium dans la nappe. Depuis 1984, des concentrations en uranium significativement plus faibles sont mesurées sur les piézomètres de COMURHEX.

La Gaffière, qui draine la nappe dans ce secteur, a également été affectée par la pollution. Les valeurs dans la rivière au niveau du site de COMURHEX ont dépassé 100 µg/L entre 1977 et 1980. Plus en aval, la pollution était progressivement diluée par les apports, soit de la nappe, soit des cours d'eau. La surveillance périodique exercée par le CEA (jusqu'en 1978), la COGEMA (1978 - 2001) puis par les filiales d'AREVA (depuis 2001) a permis d'établir une chronique des concentrations moyennes annuelles en uranium dans le Lauzon (en aval de la confluence de la Mayre-Girarde et de la Gaffière) au cours de la période 1964-2008 (Figure 31). Dans le Lauzon, la concentration en uranium (moyenne annuelle) a continuellement dépassé 10 µg/L entre 1974 et 1984 avec un pic à 28 µg/L en 1979. En tenant compte d'un débit de la rivière de 1700 m³/h (déterminé à partir des mesures de mars 2009 - voir § 2.5), on peut estimer à environ 2 tonnes la quantité d'uranium ayant transité dans le Lauzon au cours de ces 10 années.

La relation entre la pollution chronique du Lauzon au cours des années 1970-1980 et la pollution de la nappe sur le site de COMURHEX est étayée notamment par deux éléments. La décroissance du pic de concentration dans le Lauzon est contemporaine des contre-mesures prises sur le site. Les teneurs mesurées à l'époque à la sortie immédiate du site nucléaire, sont deux à trois fois supérieures à celles mesurées dans le Lauzon (croisement avec la RD8). Ce facteur de dilution est confirmé par les variations de débit de la Gaffière mesurées lors de la campagne de mars 2009 (Cf. § 2.5) entre la sortie du site (529 m³/h) et le Château de la Bâtie (1702 m³/h).

Les pollutions anciennes et en particulier celles ayant affecté la nappe au droit du site COMURHEX sont à l'origine d'une forte augmentation de la teneur en uranium dans la Gaffière et le Lauzon entre 1974 et 1984.

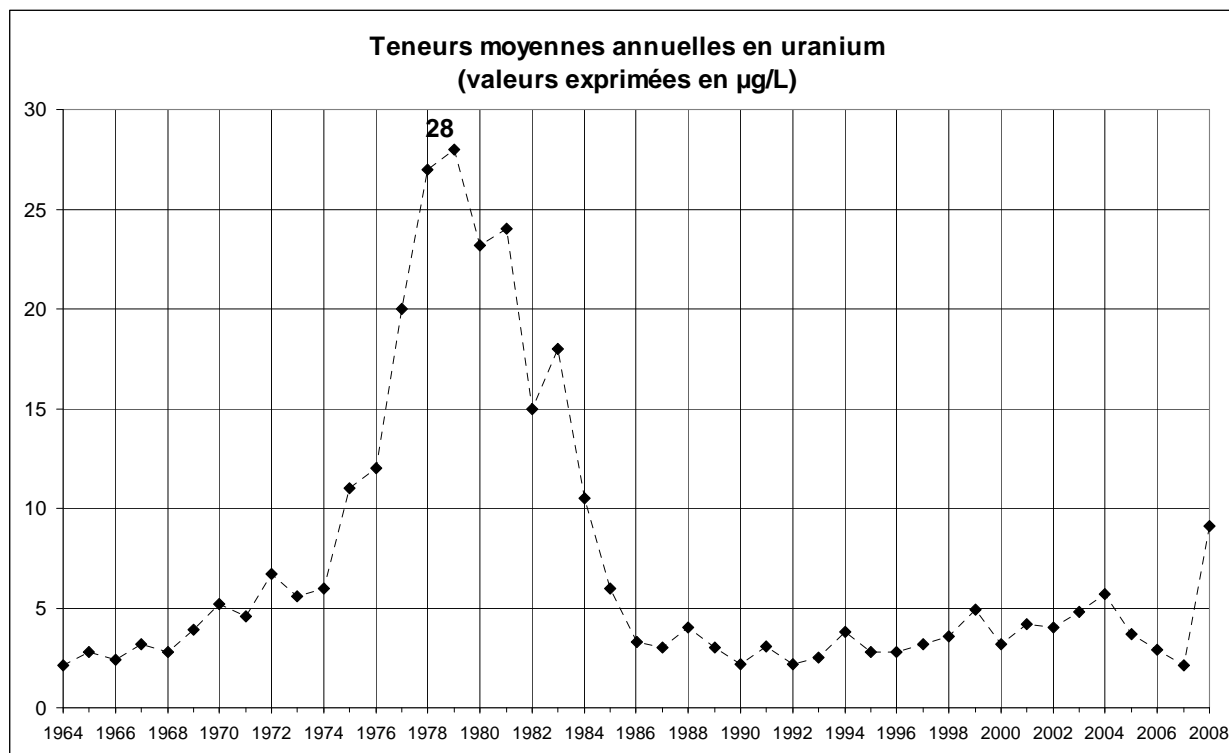


Figure 31 : Moyennes annuelles des teneurs en uranium mesurées dans le Lauzon entre 1964 et 2008

3.3.3 ETUDE DE QUELQUES TRACEURS DE L'ACTIVITE DU SITE

Après la définition des sources d'uranium au niveau du site nucléaire, la possibilité d'un cheminement entre le site et les zones 1 et 2 a été étudiée, dans un premier temps avec des traceurs. Un traceur est un élément chimique ou une composition isotopique particulière de l'uranium, qui s'ils sont mis en évidence à la fois sur le site et dans les zones 1 ou 2, attesteront sans ambiguïté d'une influence du site sur ces zones. Les traceurs utilisés sont des éléments chimiques ou des isotopes mis en œuvre sur le site.

3.3.3.1 Les traceurs chimiques

Les installations du site nucléaire mettent en œuvre de nombreux éléments chimiques susceptibles d'être présents dans les effluents liquides rejetés à l'occasion de rejets accidentels. La présence de ces éléments dans l'eau de la nappe en aval du site nucléaire, à des concentrations supérieures au bruit de fond et corrélées aux concentrations élevées en uranium démontrerait, l'influence du site nucléaire. Le bore, le chrome, le nickel et le fluor, qui sont mis en œuvre sur le site nucléaire, ont été

retenus comme traceurs. Par contre, des solvants tels que les TCE et PCE¹⁹ n'ont pas été retenus, car ils sont largement utilisés ailleurs que sur le site nucléaire.

- **Identification des traceurs chimiques présents dans la nappe sur le site nucléaire**

Comme pour l'examen des concentrations en uranium dans la nappe sur le site, l'étude s'est appuyée à la fois sur des résultats obtenus précédemment par AREVA et sur des résultats d'une campagne de mesures spécifique (voir § 3.3.2). Les prélèvements réalisés au cours de cette campagne ont permis de mesurer les concentrations en bore, fluor, chrome et nickel dans l'eau de nappe. L'ensemble des résultats est reporté en *Annexe 9*.

Les plus fortes concentrations en chrome et nickel sont observées respectivement dans les piézomètres ET38 et ET41. Ces ouvrages sont localisés à l'intérieur de la paroi moulée de SOCATRI et servent au confinement hydrodynamique de la contamination et à son extraction. En 2002, près de 1400 kg de chrome avaient été récupérés. La pollution, bien que circonscrite, ne semble pas être totalement résorbée. Pour ce qui concerne le bore, les plus fortes concentrations sont observées dans les ouvrages ET32 et ET27, localisés en aval d'EURODIF, et dans ET269. Ce dernier piézomètre présente également les teneurs les plus élevées en TCE et PCE. Enfin, les plus fortes concentrations en fluor sont observées sur le piézomètre ET212 localisé sur le site de COMURHEX.

La campagne de mesures sur les piézomètres du site nucléaire confirme les résultats de la surveillance environnementale réalisée par AREVA. En outre, les éléments chimiques (B, Cr, Ni, F) sont effectivement détectés dans les eaux de la nappe du site nucléaire.

- **Analyses chimiques dans l'environnement du site**

Les analyses chimiques réalisées par l'IRSN, le LDA26 et AREVA de juillet 2008 à octobre 2009 dans les eaux prélevées dans certains ouvrages du secteur d'étude (plan de surveillance et quatrième campagne de prélèvements) montrent de fortes variabilités des résultats. Les analyses ont porté sur les éléments chimiques suivants : fluor, bore, chrome et nickel. Ainsi, 113 points de prélèvements ont fait l'objet d'analyses dont 60 lors des campagnes réalisées par AREVA, le LDA26 et l'IRSN. Les cartes de répartition en fluor et bore sont présentées en *Annexe 10*.

Les résultats obtenus montrent que les concentrations en chrome et nickel sont généralement proches des limites de détection.

Pour ce qui concerne le bore, élément très soluble et peu retenu par les sols, les concentrations mesurées dans les ouvrages localisés au nord, à l'est et à l'ouest du site nucléaire présentent des concentrations faibles en cet élément et en uranium. Les concentrations en bore mesurées au sud de la

¹⁹ TCE : TriChloroEthylène, solvant utilisé pour le nettoyage des surfaces - PCE : PerChloroEthylène, produit organohalogéné utilisé dans le process industriel nucléaire. Les TCE et PCE sont également utilisés comme fluide caloporteur pour leur faible capacité de modération (peu hydrogénés).

plaine semblent corrélées avec les concentrations en uranium (Figure 32). En particulier, deux sources conjuguées provenant du site peuvent expliquer la tendance entre l'uranium et le bore observée dans l'environnement : *source (1)* certains piézomètres témoignant de fortes concentrations en uranium et de faibles concentrations en bore (secteur nord-est du site : ET11, PZAN3, ET212), *source (2)* d'autres piézomètres témoignant de faibles concentrations en uranium, mais de fortes concentrations en bore (secteur sud du site : ET27, ET32, ET269).

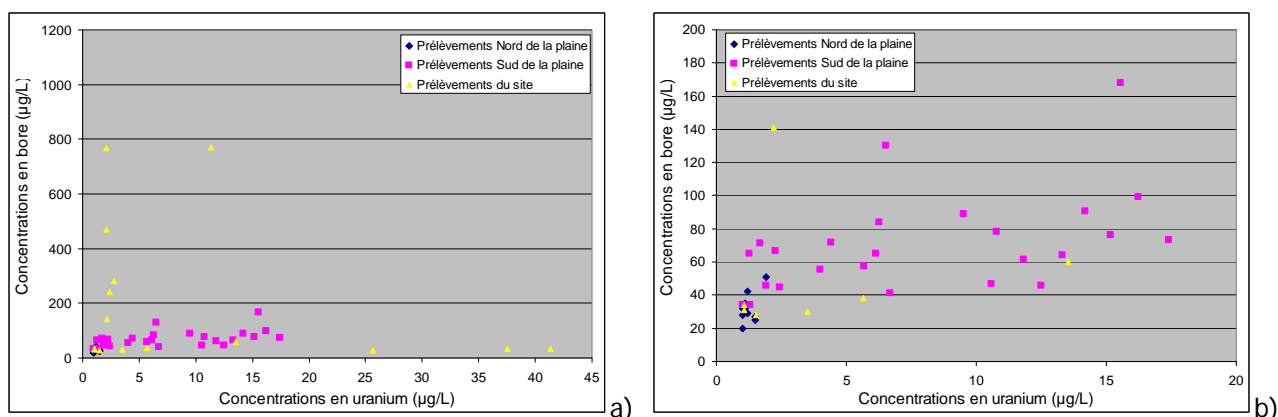


Figure 32 : a) Représentation des concentrations en bore en fonction des concentrations en uranium sur les piézomètres du site et de la plaine - b) focus sur les données du sud du site nucléaire

- Conclusion

Les plus fortes concentrations en bore, chrome, nickel et fluor sont observées au droit du site nucléaire. Les concentrations relativement élevées en bore et fluor mesurées dans la plaine peuvent provenir, soit des éléments présents naturellement dans l'environnement, soit d'une contamination industrielle autre que le site nucléaire.

Sur les quatre traceurs chimiques considérés, trois (Cr, Ni, F) ne présentent pas de corrélation de leurs teneurs avec celles mesurées pour l'uranium. Pour ce qui concerne le bore, les concentrations mesurées au sud de la plaine semblent corrélées avec les concentrations d'uranium. Pour l'IRSN, cette corrélation, qui pourrait indiquer une influence du site nucléaire, doit cependant être considérée avec précaution compte tenu de la variabilité des résultats relatifs au bore.

3.3.3.2 Les rapports isotopiques de l'uranium

L'industrie nucléaire utilise l' ^{235}U (isotope fissile) pour produire de l'énergie. Les proportions de ^{235}U étant trop faibles à l'état naturel (0,72 %), un enrichissement est réalisé jusqu'à obtention de rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ de 3 à 5% pour le combustible nucléaire civil et jusqu'à 100% pour la fabrication d'armes nucléaires. Ces taux d'enrichissement ne peuvent être obtenus que par un procédé industriel.

Ainsi, la présence dans l'environnement du site, d'uranium dont le rapport $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ est supérieur au rapport isotopique de l'uranium naturel serait attribuée sans ambiguïté à un rejet d'uranium enrichi produit sur le site de Tricastin. Cependant, la mesure d'uranium dont le rapport $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ est proche de celui de l'uranium naturel n'écarte pas l'hypothèse d'une influence du site nucléaire, puisque de l'uranium naturel et de l'uranium appauvri y sont également mis en œuvre.

Situation actuelle

Les analyses isotopiques réalisées au cours de l'étude, à la fois sur le site nucléaire et dans l'environnement sont présentées sur la Figure 33. Les prélèvements effectués au sud du site nucléaire montrent des rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ des eaux proches du rapport isotopique de l'uranium naturel (0,72 %). Pour ce qui concerne les prélèvements d'eau de nappe sur le site nucléaire (cf. *Annexe 9*), il est à noter que les rapports isotopiques varient de 0,71 % à 1,6 %. Le rapport le plus élevé est mesuré sur le piézomètre ET11 (concentration en uranium : 41 $\mu\text{g}/\text{L}$), localisé en bordure est du site nucléaire. Pour une concentration comparable (38 $\mu\text{g}/\text{L}$), l'ouvrage PZAN3 (nord du site nucléaire) présente un rapport de 0,72 %.

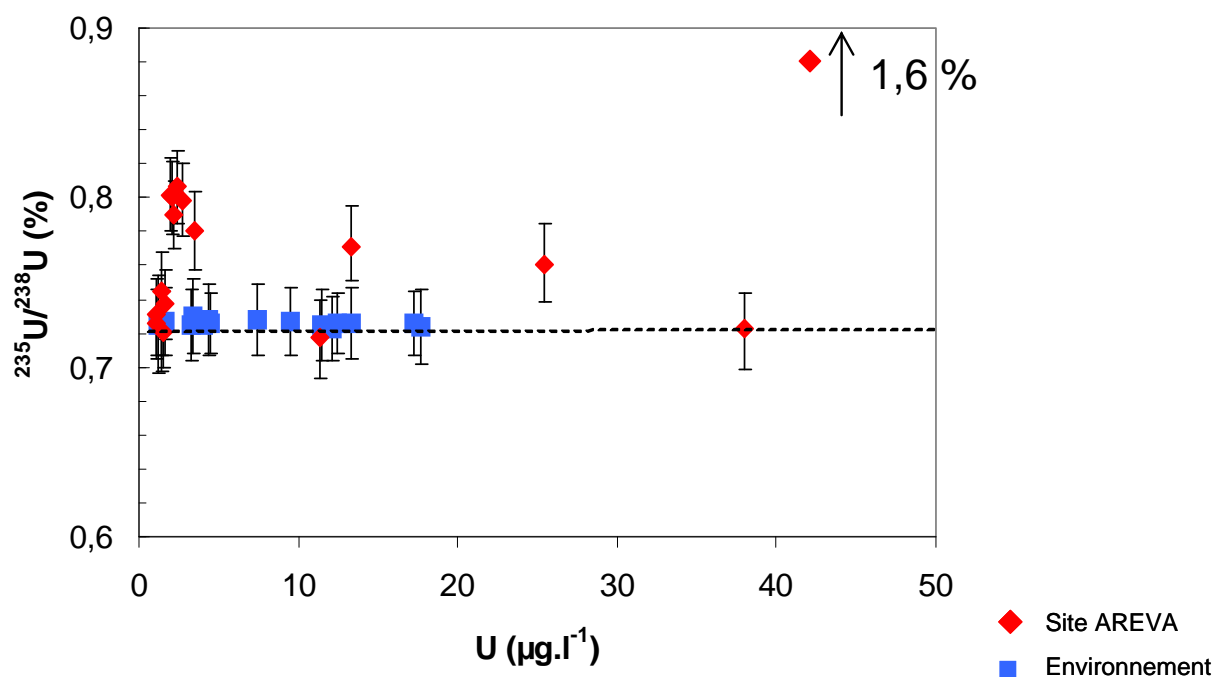


Figure 33 : Rapports isotopiques de l'uranium en fonction des concentrations en uranium mesurées dans les eaux prélevées sur le site AREVA et dans l'environnement du site

Les rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés dans l'eau de la nappe au sud du site (Annexe 11) montrent une composition isotopique proche de celle de l'uranium naturel (0,72 %). Aucun des points de mesure ne présente de composition isotopique dénotant un enrichissement significatif. Les rapports isotopiques mesurés dans l'environnement sont équivalents à ceux mesurés en quelques points du

site nucléaire. Les autres points du site présentent des rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ compris entre 0,74 et 1,6 %.

Situation passée

Il a été évoqué précédemment que les rejets du site nucléaire entre 1974 et 1984 (§ 3.3.2) pourraient constituer un terme source à l'origine des concentrations en uranium mesurées dans la nappe. Les analyses isotopiques datant de cette période sont relativement peu nombreuses.

L'examen des quelques données historiques disponibles (*Annexe 12*) montre que les plus fortes concentrations en uranium pondéral étaient principalement observées sur le site de COMURHEX. Les rapports isotopiques déterminés en 1977 présentent de nombreuses incohérences ; ainsi :

- les rapports isotopiques mesurés dans la Gaffière sur G31 sont plus élevés que ceux des sources potentielles d'uranium enrichi (« butte de stockage » et COMURHEX) ;
- les rapports isotopiques obtenus sur F5, seul forage au pied de la « butte de stockage » présentant des teneurs significatives en uranium, sont supérieurs au taux d'enrichissement moyen (2 %) des déchets enfouis [41] ;
- des variations significatives de l'enrichissement (1,16% à 4,74%) ont été enregistrées sur P2(ET210) sur un laps de temps très court (6 jours).

Les données de 1979 ne concernent que les valeurs de rapports isotopiques ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) et ne fournissent pas les valeurs des teneurs pondérales en uranium. Elles montrent que :

- le rapport isotopique mesuré dans le forage F5 est toujours supérieur à celui des déchets enfouis ;
- le rapport isotopique mesuré dans le puits P2(ET210) est proche du rapport de l'uranium naturel (0,72%), alors qu'il présentait un rapport élevé en 1977 (> 1%) ;
- les données disponibles sur la Gaffière (G32, G35 et GAF4) montrent des rapports isotopiques allant de 0,97 % à 0,72 %.

Pour l'IRSN, les incohérences relevées sur les données isotopiques de 1977 et 1979 ne permettent pas de tirer de conclusion sur les niveaux d'enrichissement de l'uranium polluant la nappe à cette époque.

3.3.3.3 Conclusion de l'étude des traceurs de l'activité du site nucléaire

Le bore, le chrome, le nickel et le fluor sont observés à de fortes concentrations dans la nappe en différents points du site nucléaire. La présence de ces éléments dans l'eau de nappe en aval hydraulique du site nucléaire, à des concentrations supérieures au bruit de fond et corrélées aux concentrations élevées d'uranium, démontrerait l'influence du site nucléaire. Le chrome et le nickel ne sont pas détectés en dehors du site nucléaire. Les concentrations relativement élevées en fluor mesurées dans la plaine ne présentent pas de corrélation avec les concentrations en

uranium. Pour ce qui concerne le bore, les concentrations mesurées au sud de la plaine semblent corrélées avec les concentrations en uranium. Cette corrélation, qui pourrait indiquer une influence du site nucléaire, doit cependant être considérée avec précaution compte tenu de la variabilité des résultats relatifs au bore.

Les activités industrielles actuelles et passées du site nucléaire du Tricastin ont marqué et continuent à marquer la nappe sous le site nucléaire à la fois avec de l'uranium naturel et de l'uranium enrichi. Les rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés en 2008 et 2009 dans l'eau de la nappe au sud du site (Annexe 11) montrent une composition isotopique proche de celle de l'uranium naturel (0,72 %). Aucun des points de mesure ne présente de composition isotopique dénotant un enrichissement significatif. Les rapports isotopiques mesurés dans l'environnement sont équivalents à ceux mesurés en quelques points du site nucléaire. Les autres points du site présentent des rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ compris entre 0,74 et 1,6 %.

Il existe très peu de données historiques concernant des mesures d'isotopie de l'uranium dans l'eau de la nappe ou la Gaffière sur le site et dans l'environnement. Les seules données disponibles concernent les années 1977 et 1979. Pour l'IRSN, les incohérences relevées sur ces données isotopiques ne permettent pas de tirer de conclusion sur les niveaux d'enrichissement de l'uranium polluant la nappe à cette époque.

L'étude de l'isotopie de l'uranium ne permet donc pas d'établir de lien indiscutable entre le site nucléaire et les concentrations élevées en uranium observées actuellement dans la nappe. Cependant, l'hypothèse d'une contribution des activités utilisant de l'uranium naturel sur le site nucléaire au marquage de la nappe ne peut pas être écartée.

3.3.4 ETUDE DES TRANSFERTS DANS LA NAPPE ALLUVIALE

L'analyse des éléments chimiques et de l'isotopie de l'uranium comme traceurs des activités du site ne permet pas de conclure sur l'influence du site nucléaire. La comparaison directe des pollutions de la nappe alluviale sur le site et des caractéristiques de l'eau de la nappe dans les zones 1 et 2 n'est pas suffisante. L'étude s'est donc orientée sur l'examen des cheminements de l'eau de la nappe depuis le site nucléaire, afin d'évaluer la possibilité que des chemins existent entre le site et les zones 1 et 2.

3.3.4.1 Analyse des données hydrogéologiques

La Figure 34 synthétise les données acquises au cours de l'étude pour ce qui concerne :

- la localisation des zones de la plaine du Tricastin qui présentent un marquage en uranium (zones 1 et 2),
- la piézométrie de la nappe, l'écoulement de la nappe se faisant perpendiculairement aux courbes isopièzes représentées,
- les relations entre, d'une part le Lauzon et ses affluents, d'autre part la nappe alluviale.

A partir de ces éléments et compte tenu du fait que l'essentiel des pollutions en uranium connues sur le site se situent dans la partie nord-est de celui-ci, il est possible de faire une première évaluation des possibilités de cheminement d'une pollution de la nappe depuis le site jusqu'aux zones 1 et 2.

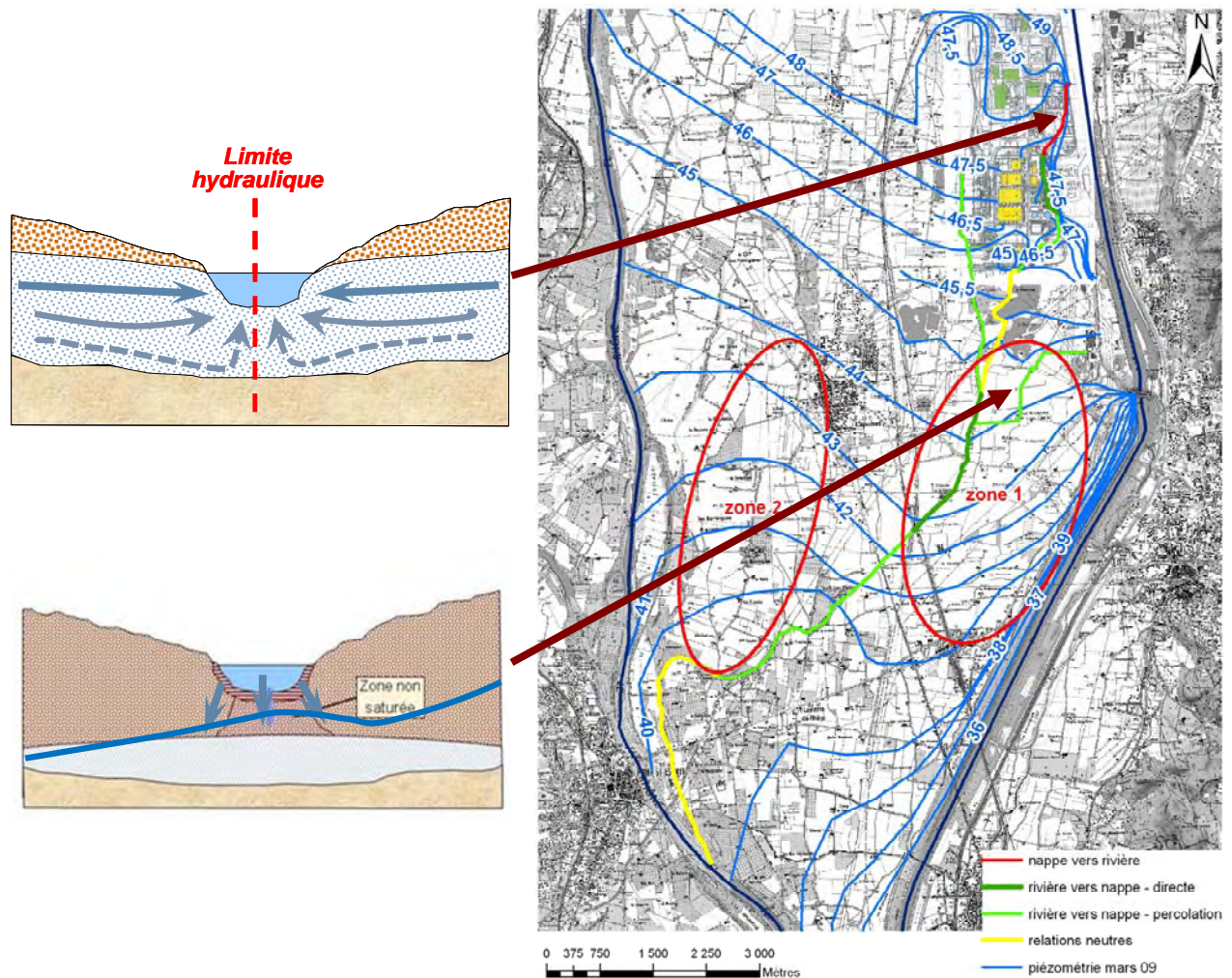


Figure 34 : Synthèse des données acquises sur les relations nappe / rivières, la piézométrie et les zones présentant un marquage par de l'uranium

Pour ce qui concerne un éventuel cheminement depuis le site nucléaire jusqu'à la zone 2, il apparaît en premier lieu que les écoulements de la nappe dans la partie nord-est du site sont dirigés pour l'essentiel vers la Gaffière et vers le pompage implanté au nord-ouest du site. Cependant des pollutions ont pu intervenir sur le site avant la mise en place de ce pompage. On peut également poser l'hypothèse d'une pollution ancienne non connue dans la partie ouest du site. Le long de la limite ouest du site et en faisant abstraction de l'influence du pompage, les écoulements de la nappe sont orientés vers le sud-sud-ouest. Compte tenu de ces hypothèses très difficiles à vérifier, il apparaît

possible de tracer un chemin entre le site et la zone 2, en suivant certaines directions d'écoulement de la nappe.

Pour ce chemin hypothétique, il faut prendre en compte la vitesse de transfert de l'uranium dans la nappe. D'après les données bibliographiques et les éléments présentés au point 2.6.5.2, la vitesse moyenne de l'uranium dans la nappe alluviale peut être estimée entre 10 à 50 m/an. Ceci conduit à une distance parcourue en 20 ans d'au plus 1 km et en 50 ans d'au plus 2,5 km. Or la longueur du chemin envisageable entre le site et la zone 2 est supérieure à 4 km, valeur minimale mesurée entre la limite ouest du site et la limite amont de la zone 2. Si l'on remarque de plus que, le long de ce chemin hypothétique, aucun indice de marquage n'existe entre le site et la zone 2, il est possible de conclure que le site nucléaire n'est pas à l'origine du marquage en uranium de la nappe alluviale observé dans la zone 2.

Pour ce qui concerne un éventuel cheminement depuis le site jusqu'à la zone 1, la chronique des concentrations moyennes annuelles en uranium mesurée dans le Lauzon présentée au § 3.3.2.2 démontre qu'une pollution en uranium de la nappe dans le secteur de l'installation COMURHEX a conduit à un transfert significatif d'uranium dans la Gaffière et le Lauzon au cours des années 1974-1984. L'alimentation de la Gaffière par la nappe dans ce secteur est confirmée par les mesures de jaugeage sur la base desquelles les échanges entre nappe et rivière sont représentés sur la Figure 34. Cette figure montre également que, plus au sud, la Gaffière et le Lauzon alimentent la nappe alluviale. L'étude s'est donc portée sur l'examen de la possibilité d'un cheminement depuis ces rivières jusqu'à la zone 1.

Cet examen a nécessité la mise en œuvre de modèles hydrogéologiques permettant d'étudier les possibilités de transfert d'une pollution entre les rivières et la nappe alluviale ainsi qu'au sein de la nappe en testant différentes hypothèses. Les modèles utilisés sont des modèles numériques qui représentent de manière simplifiée l'aquifère constitué par les alluvions, afin de reproduire les écoulements de la nappe et, le cas échéant, d'éléments chimiques en solution dans l'eau. La couche d'alluvions est représentée par un ensemble de mailles carrées juxtaposées. A chaque maille sont attribuées des caractéristiques constantes (épaisseur, perméabilité, coefficient d'emmagasinement) et des paramètres qui peuvent varier tels que la charge hydraulique (hauteur de la nappe), les débits prélevés ou injectés par exemple pour représenter les infiltrations d'eau de pluie. Les charges hydrauliques dans chaque maille sont calculées en définissant dans un premier temps des conditions aux limites du modèle (par exemple des conditions d'infiltration et de drainage le long du Rhône et du canal de Donzère-Mondragon). La charge hydraulique dans chaque maille est calculée par approximations successives à partir des charges dans les mailles voisines. A partir des charges hydrauliques calculées, il est possible d'établir des cartes piézométriques, de calculer la vitesse de l'eau dans chaque maille et de déterminer des trajectoires de l'eau et de produits en solution.

3.3.4.2 Présentation des résultats des modélisations effectuées par ANTEA

Sur la base des données géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de la plaine du Tricastin, ANTEA a bâti, pour le compte d'AREVA, un modèle hydrodynamique du secteur d'étude [19] focalisé sur la zone comprise entre le site nucléaire au nord, le canal d'amenée et le canal de fuite à l'est, la Mayre Girarde et le Lauzon à l'ouest et le Château de la Bâtie au sud. Le code de calcul utilisé pour la modélisation hydraulique est le logiciel MARTHE²⁰. Le modèle comporte environ 178 000 mailles de 10 mètres de côté. Les données d'entrée du modèle, définies maille par maille, sont les suivantes :

- géométrie de la couche d'alluvions (base et sommet),
- perméabilité,
- coefficient d'emmagasinement,
- débits pompés et injectés,
- recharges par les pluies.

Le logiciel permet de prendre en compte les échanges entre nappe et rivières en calculant simultanément les niveaux de la nappe et les débits des cours d'eau. Ces derniers peuvent alimenter ou drainer la nappe le long de leurs parcours en fonction des niveaux d'eau déterminés dans la rivière et dans la nappe. Les cours d'eau sont définis par leurs géométries (profondeurs, largeurs), leurs lignes d'eau (altitude de la surface de l'eau) et le degré de colmatage de leurs lits (aptitude à laisser percoler l'eau). Enfin, les différents plans d'eau actuellement présents dans le secteur d'étude sont modélisés et représentés comme des zones à perméabilité « infinie » afin d'en reproduire le comportement (drainage à l'amont ; alimentation à l'aval).

Les simulations ont été effectuées en régime permanent, *i.e.* sans prendre en compte les variations naturelles des débits des cours d'eau et du niveau de la nappe liées à la recharge. Il s'agit d'une approche reflétant un écoulement moyen.

Le modèle a fait l'objet d'un calage (confrontation des données simulées et des données mesurées), d'une part sur les données piézométriques relevées en mars 2009, d'autre part sur les jaugeages réalisés à la même période dans les différents cours d'eau. Les colmatages des berges et du lit des rivières ont ainsi été définis graduellement afin d'éviter les contrastes trop marqués. La comparaison entre la piézométrie mesurée en mars 2009 et celle modélisée, présentée sur la Figure 35, montre que le modèle reproduit de manière satisfaisante les niveaux de la nappe mesurés.

²⁰ MARTHE : Modélisation d'Aquifère avec maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiqueE - Chaîne de logiciels conçue et réalisée par le groupe BRGM. Plus d'infos sur le site du BRGM : <http://www.brgm.fr/logiciel.jsp>

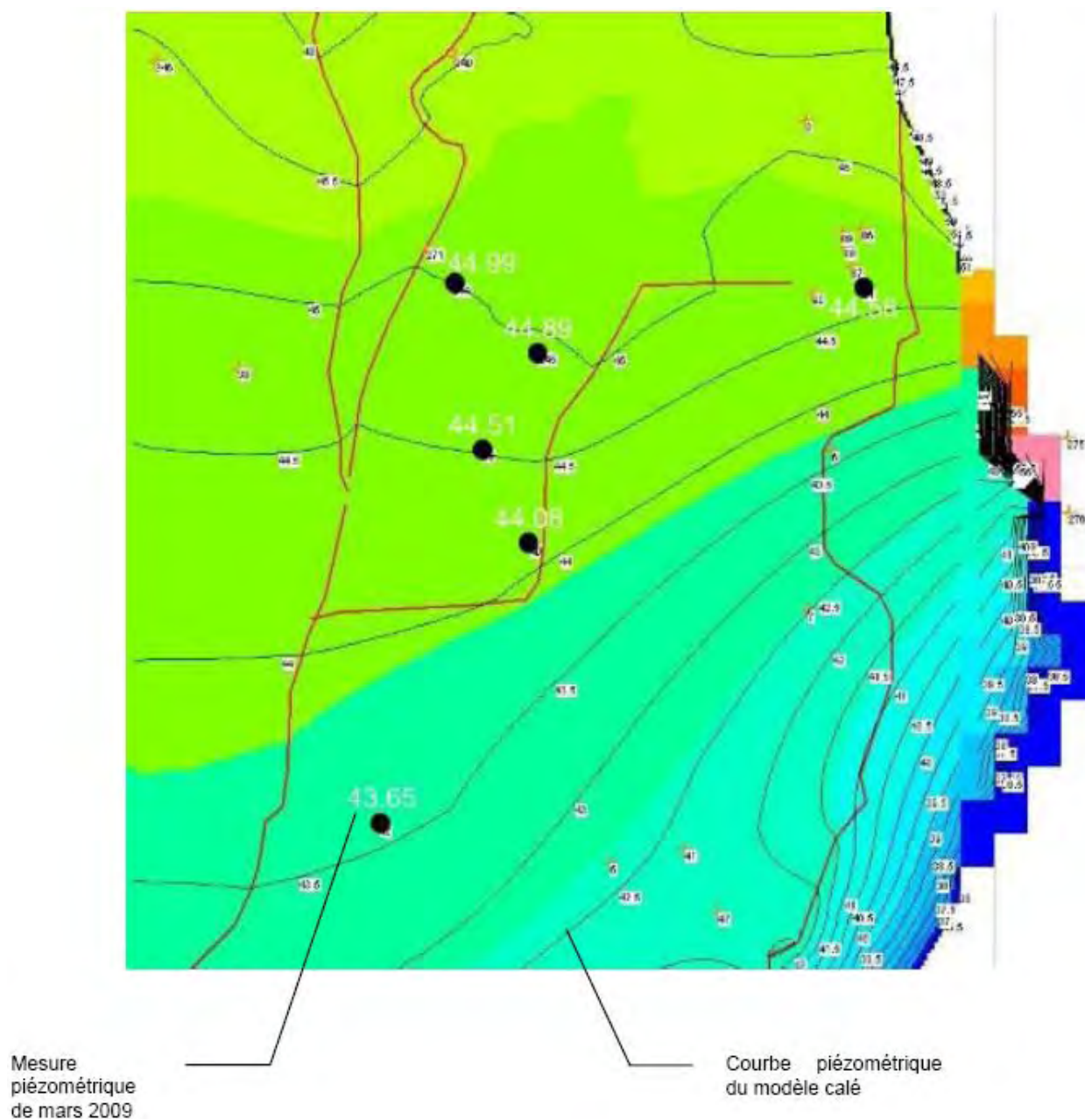


Figure 35 : Piézométrie calculée par le modèle ANTEA (lignes noires et cartouches sur fond blanc) avec report des mesures de la campagne de mars 2009

L'exploitation du modèle (après calage) a consisté en l'application d'une concentration homogène et constante dans le temps de 28 $\mu\text{g/L}$ dans la Gaffière et le Lauzon sans limite de durée, afin d'examiner l'impact sur la nappe. Cette valeur correspond à la valeur maximale des moyennes annuelles observées depuis 1964 dans le Lauzon. Dans les conditions prises en compte, la teneur maximale observée dans la nappe serait de 17,5 $\mu\text{g/L}$. Cependant, la partie de la nappe alluviale affectée par la pollution se situe au sud de la confluence entre la Mayre Girarde et la Gaffière (voir Figure 36 - zone représentée en bleu) et ne correspond donc pas à la zone 1 qui s'étend plus au nord. ANTEA a étudié l'influence sur la délimitation du panache de pollution modélisé du débit d'infiltration de la nappe par le Grand Béal qui

traverse la partie nord de la zone 1 (voir Figure 36). Même en annulant ce débit, le secteur affecté par la pollution ne coïncide pas avec la zone 1.

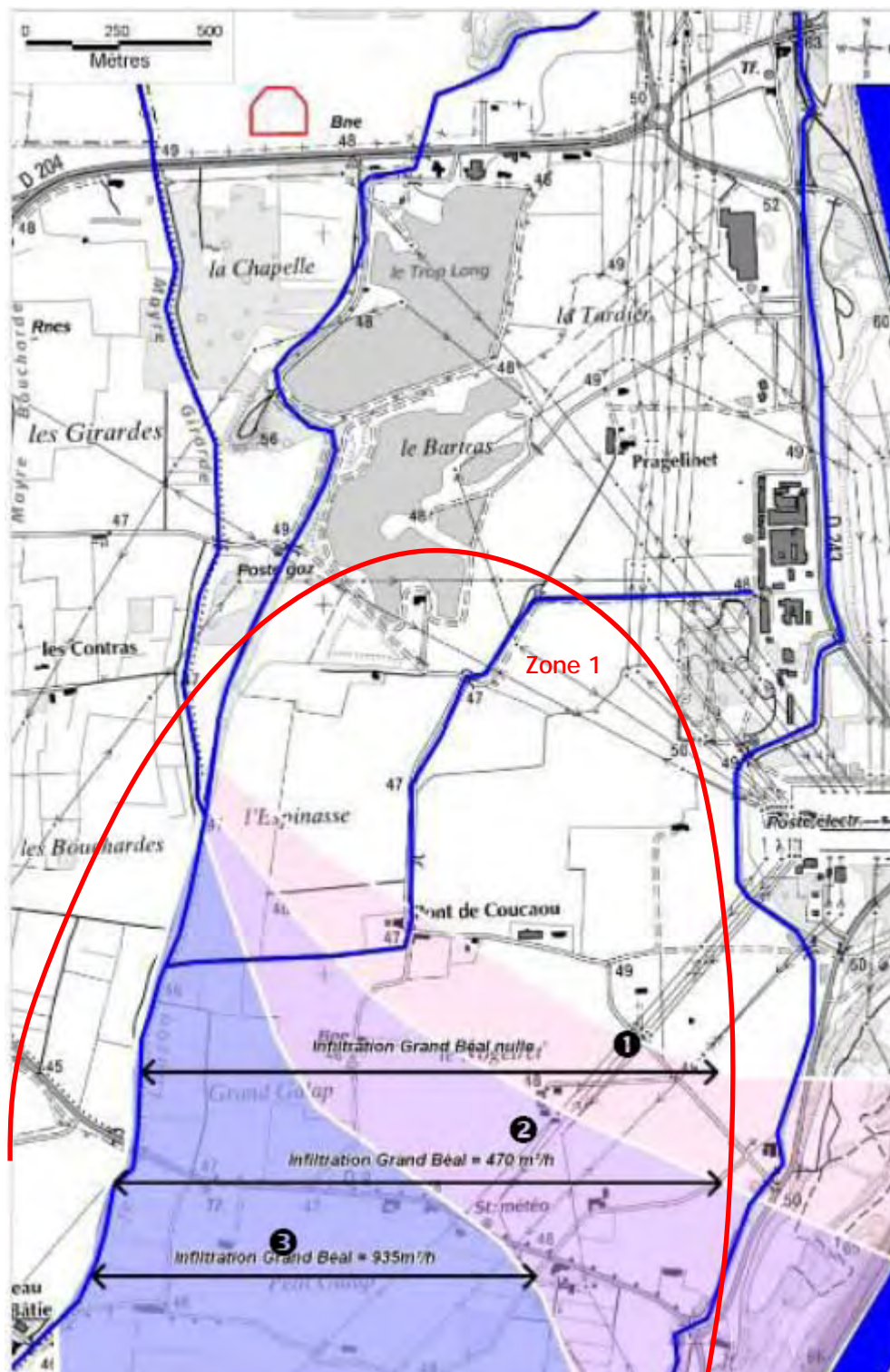


Figure 36 : Carte calculée par ANTEA des zones polluées pour différents scénarios d'infiltration du Grand Béal

D'après les modélisations réalisées par ANTEA pour le compte d'AREVA, la pollution ancienne de la Gaffière et du Lauzon n'aurait pu affecter que la partie de la nappe alluviale située au sud de la confluence entre la Mayre Girarde et la Gaffière et ne correspond donc pas avec l'ensemble de la zone 1 dont une partie s'étend plus au nord.

La présentation de ces travaux lors de la réunion du Groupe de Suivi, du 2 février 2010 [14] a soulevé des questions de la part des membres du Groupe de Suivi notamment sur la représentativité du modèle, calé sur des mesures récentes, pour caractériser les écoulements passés (1974 - 1984) et sur la prise en compte des plans d'eau (Trop Long, Bartras et Girarde) dans le modèle d'écoulement.

3.3.4.3 Présentation des résultats de la modélisation effectuée par l'IRSN

Afin de répondre aux interrogations des membres du Groupe de Suivi, l'IRSN a construit un modèle hydrodynamique du secteur déjà modélisé par ANTEA, avec pour objectif de tester différentes hypothèses. Le code de calcul utilisé pour cette modélisation est le logiciel MODFLOW ; le modèle comporte 200 000 mailles. Les limites du modèle sont établies à partir des observations de terrain : canal de fuite, rivières, lignes de courant, etc. Comme pour le modèle MARTHE, les données d'entrée sont spatialisées et issues de la campagne de piézométrie et de jaugeage de mars 2009 [19]. Le modèle est calé sur les données de piézométrie de mars 2009 et les conductances (capacité à laisser circuler l'eau) des lits des rivières sont ajustées pour reproduire de manière satisfaisante les informations (piézométrie et jaugeage) issues des campagnes de mesures (Figure 37).

L'application d'une concentration homogène et constante dans le temps de 28 µg/L dans la Gaffière et le Lauzon aboutit à la détermination d'une zone affectée comparable à celle obtenue par la modélisation d'ANTEA, malgré les quelques différences observées localement sur la piézométrie calculée. Ayant vérifié la cohérence du fonctionnement de son modèle avec celui élaboré par ANTEA, l'IRSN a ensuite examiné plus particulièrement :

- la représentation par le modèle des échanges entre les cours d'eau et la nappe,
- la représentation par le modèle des plans d'eau du secteur,
- la chronique des concentrations en uranium dans la Gaffière et le Lauzon.

Au cours des tests effectués sur le modèle IRSN, il est apparu que celui-ci ne représentait pas correctement le transfert de soluté depuis un cours d'eau vers la nappe lorsque les conditions d'écoulement de la nappe ne sont pas identiques en rive droite et en rive gauche de la rivière. Ainsi, lorsque La Gaffière est alimentée par la Mayre Girarde par sa rive droite et alimente en même temps la nappe par sa rive gauche, le modèle ne tient compte que du bilan des échanges entre la nappe et la rivière. Dans la mesure où les apports en rive droite sont supérieurs aux pertes en rive gauche, il ne représente pas le départ de soluté vers la nappe en rive gauche. Par conséquent, la zone affectée par la pollution déterminée d'après le modèle est artificiellement réduite. Il est possible que le modèle d'ANTEA présente le même biais de simulation. L'IRSN a corrigé dans son modèle le biais

de représentation des échanges entre la rivière et la nappe lorsque les échanges sont opposés pour les deux rives.

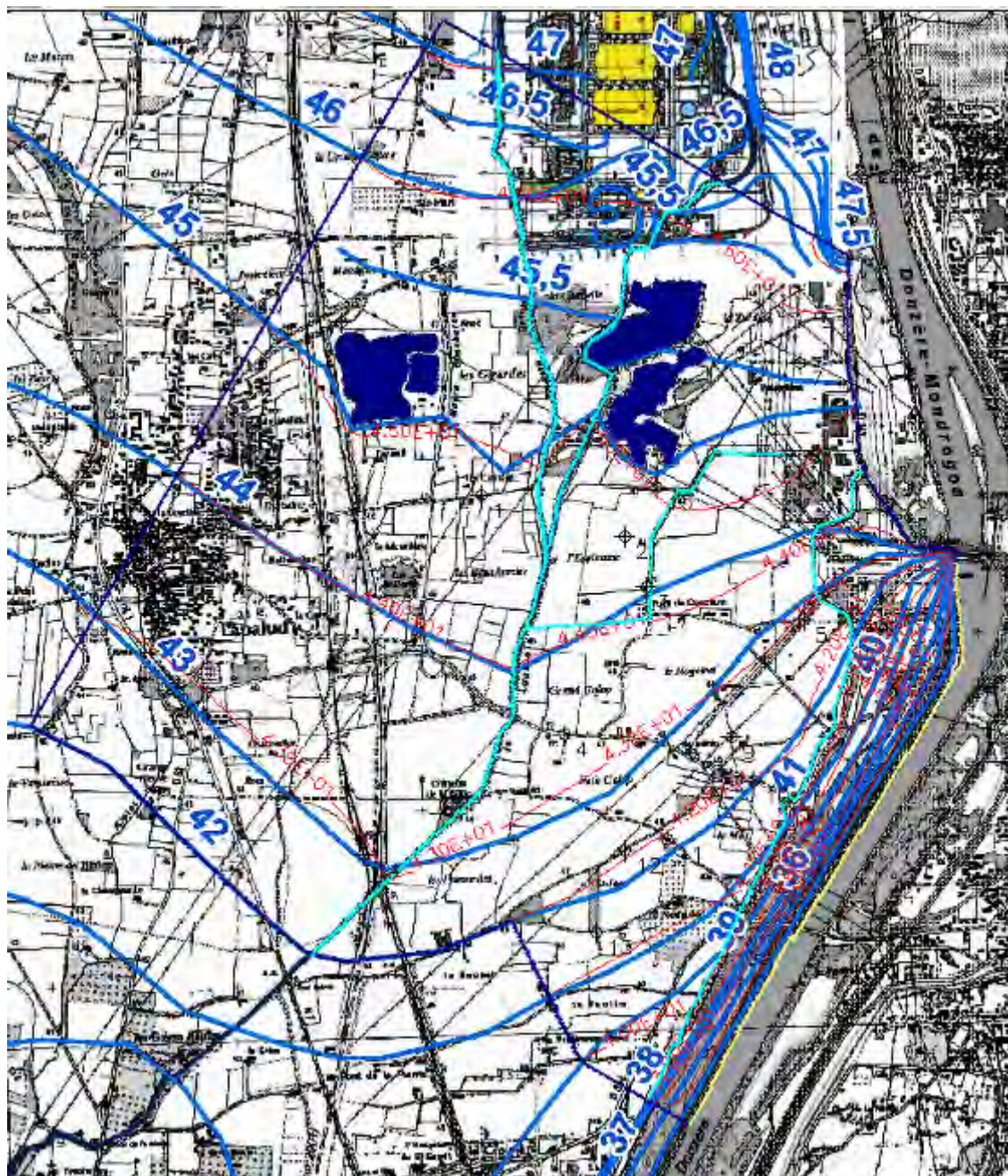


Figure 37 : Résultats de la modélisation hydrodynamique (rouge) comparés à la piézométrie mesurée (bleue)

Le Grand Béal joue un rôle important sur les écoulements de la nappe dans la zone 1. Les mesures de jaugeages effectuées en 2009 montrent une très forte alimentation de la nappe dans la partie amont de ce cours d'eau. Cependant, la localisation de ces pertes reste imprécise et ne peut pas être affinée sur la base des rares données piézométriques disponibles à proximité. L'IRSN a donc choisi de retenir,

comme ANTEA, le débit d'infiltration depuis le Grand Béal en tant que variable d'une étude de sensibilité.

Les contacts pris par l'IRSN avec les entreprises RAZEL et GTM Terrassement (Groupe Vinci) ont permis de déterminer que les anciennes gravières de Lapalud (plan d'eau les Girardes) et de Bollène (Bartras Sud) ont été exploitées de 1996 à 1999 pour le terrassement de la ligne LGV Méditerranée. Ces prélèvements ont été réalisés sous eau à la dragueline et l'ensemble des formations (limons et alluvions) ont été extraits. Ces plans d'eau sont donc nettement postérieurs à la période de 1974 à 1984 durant laquelle de fortes concentrations en uranium ont été observées dans la Gaffière et le Lauzon. Le lac Trop Long résulte, quant à lui, de l'exploitation d'une gravière utilisée lors de la construction du CNPE, à la fin des années 1970. **Au cours de la période allant de la fin des années 1970 jusqu'au milieu des années 1990, le seul plan d'eau existant à proximité de la zone 1 était le lac Trop Long ; l'IRSN a donc retenu cette configuration dans sa modélisation.**

Les simulations d'ANTEA et de l'IRSN montrent qu'à l'aval immédiat du site nucléaire, les relations hydrauliques existantes entre La Gaffière, la nappe et le lac Trop Long peuvent contribuer à un transfert d'uranium de la Gaffière vers le lac Trop Long *via* la nappe. Ainsi, de 1974 à 1984, les échanges entre La Gaffière et le lac Trop Long ont pu aboutir à une augmentation des teneurs en uranium dans le plan d'eau, celui-ci se comportant alors comme une source de contamination potentielle. L'IRSN s'est assuré que son modèle représente le transfert d'uranium de la Gaffière vers le lac Trop Long, puis vers la nappe.

La concentration en uranium dans le Lauzon prise en compte par ANTEA dans ses modélisations est la concentration moyenne au cours de l'année 1979 (la plus forte mesurée) qui est maintenue constante au cours du temps. Le modèle développé par l'IRSN permet de simuler des écoulements en régime transitoire et d'injecter un polluant (ici l'uranium) suivant une chronique en créneaux simplifiée pour se rapprocher de celle mesurée dans le Lauzon entre 1974 et aujourd'hui (Figure 38). Il convient également de rappeler que cette chronique correspond à des mesures effectuées en aval de la Gaffière et de la Mayre Girarde. Les teneurs mesurées à l'époque, à la sortie immédiate du site nucléaire, sont deux à trois fois supérieures à celles mesurées dans le Lauzon (voir § 3.3.2.2). Cet élément est pris en compte dans l'interprétation des résultats de la modélisation. **Les modélisations de l'IRSN représentent de manière simplifiée la chronique des concentrations en uranium observées dans le Lauzon.**

La modélisation élaborée par ANTEA représente des conditions qui ne varient pas dans le temps : la pollution dans les cours d'eau est permanente, l'évaluation de son effet est donc majorée de ce point de vue. Elle ne tient pas compte à la fois de l'évolution des concentrations dans les cours d'eau évoquée ci-dessus et de la vitesse de migration de l'uranium dans la nappe. D'après les données

bibliographiques et les éléments présentés au paragraphe 2.6.5.2, la vitesse moyenne de l'uranium dans la nappe alluviale peut être estimée entre 10 à 50 m/an. Les modélisations de l'IRSN représentent de manière simplifiée les interactions entre l'uranium et les alluvions, qui influent sur la vitesse de migration de l'uranium dans la nappe alluviale.

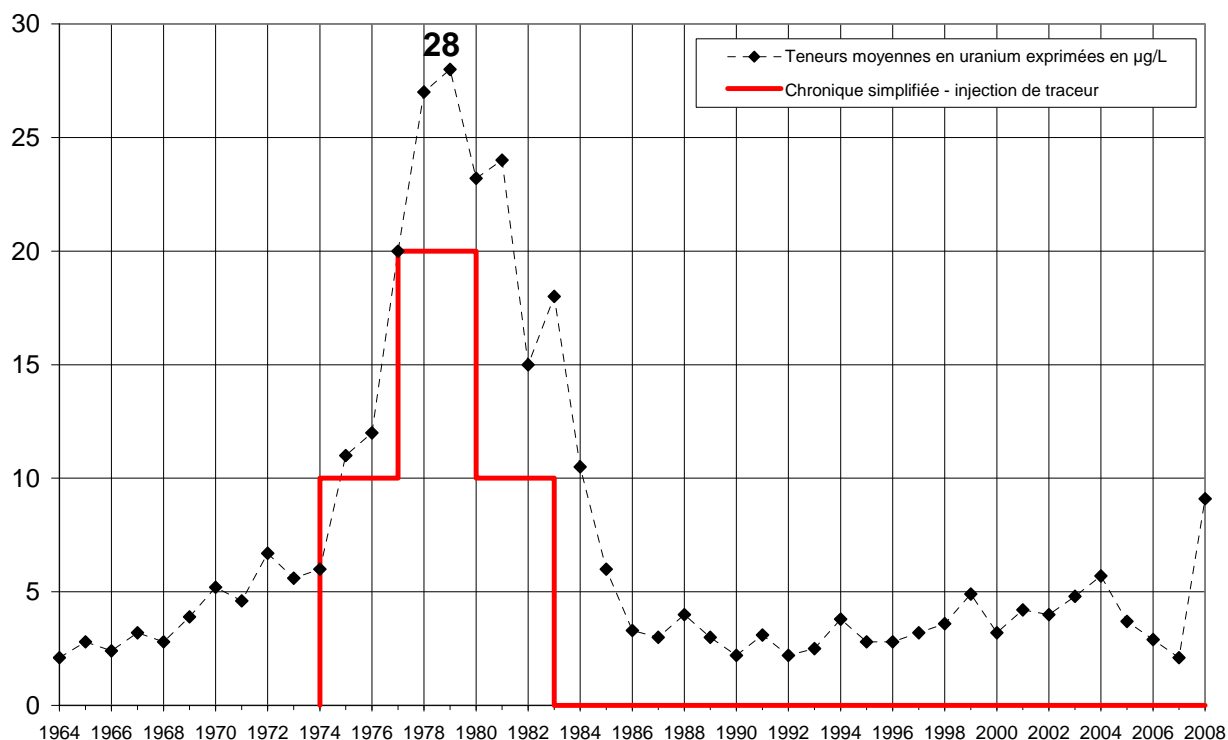


Figure 38 : Chronique des concentrations moyennes annuelles en uranium dans le Lauzon (en µg/L) et chronique simplifiée utilisée par l'IRSN pour sa modélisation.

Les données d'entrée du modèle IRSN, calé sur les données de mars 2009, comportent donc les modifications suivantes par rapport à la modélisation effectuée par ANTEA:

- retrait des plans d'eau Les Girardes et Bartras Sud ;
- prise en compte de l'influence du lac Trop Long sur les écoulements ;
- prise en compte d'une éventuelle contamination du lac Trop Long par de l'eau en provenance de la Gaffière. Le lac Trop Long se comporterait alors comme une source de contamination indirecte ;
- application d'une chronique simplifiée de concentrations en uranium en fonction du temps (Figure 38) ;
- suppression des apports du Béal, ce qui constitue une hypothèse forte, car les débits du Grand et du Petit Béal, bien qu'incertains sur la période modélisée, ne devaient pas être nuls ;
- prise en compte d'un facteur de retard de l'uranium tel que déterminé, par l'analyse des données observées dans les piézomètres disposés le long du Lauzon (Cf. § 2.6.5).

Dans ces conditions de calcul, la pollution des cours d'eau atteint la nappe dès le sud du site nucléaire. La pollution de la nappe forme ensuite un panache qui se propage vers le Sud-Est. La Figure 39 représente la position du panache de pollution 35 ans après le début de l'épisode de pollution de la Gaffière, soit la situation calculée pour l'année 2010. Les concentrations calculées dans le panache sont, au maximum de 20 µg/L, en tenant compte des concentrations historiques trois fois plus fortes dans la Gaffière que dans le Lauzon. A l'heure actuelle (2010), la zone 1 pourrait correspondre au passage d'un panache d'uranium, dont l'origine proviendrait de pollutions de la nappe sous le site nucléaire datant de la période 1974-1984.

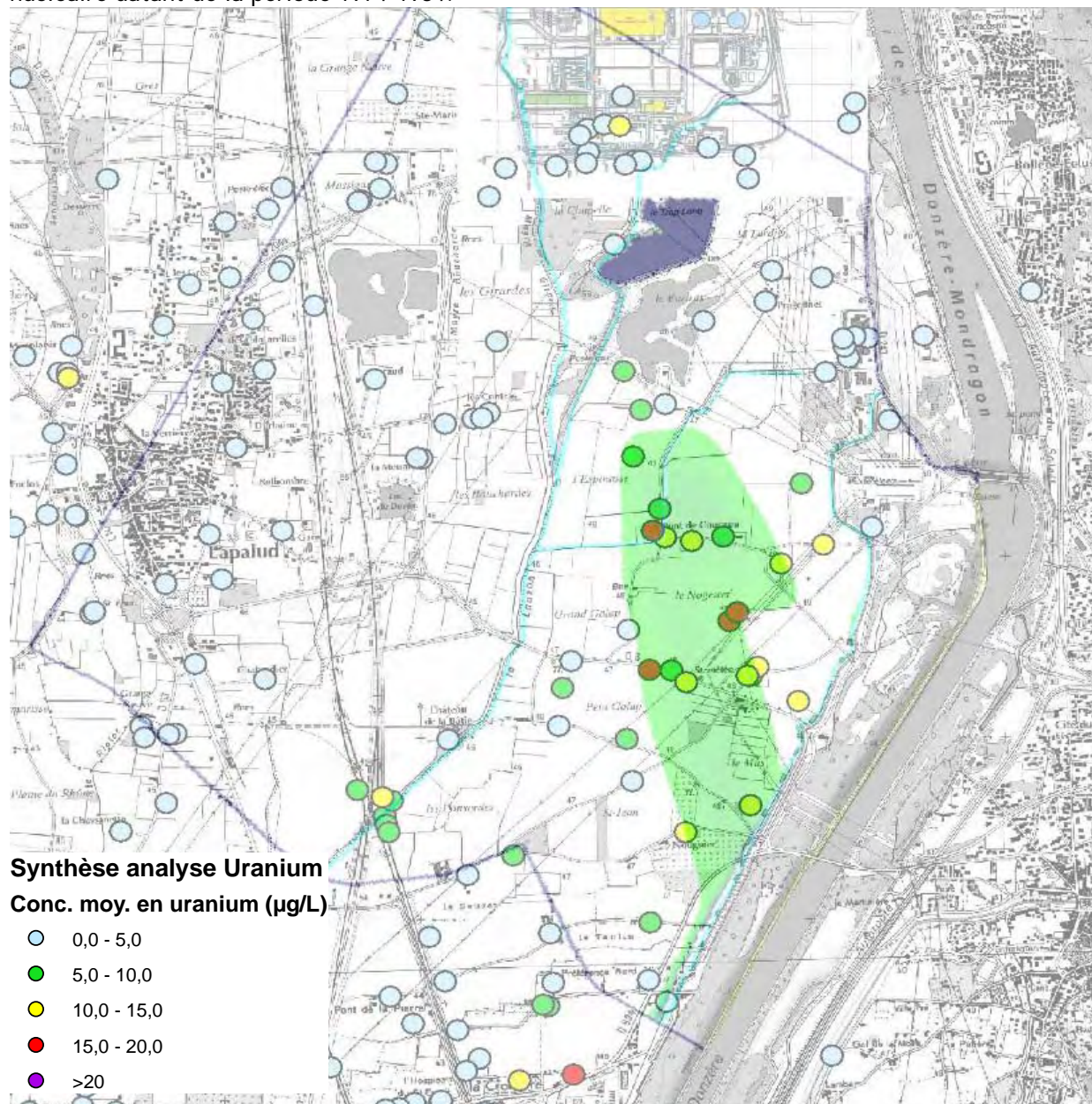


Figure 39 : Modélisation d'un transfert de soluté entre La Gaffière-Lauzon et le lac Trop Long - Les concentrations calculées dans la zone verte sont comprises entre 6 et 20 µg/L (au-delà du bruit de fond)

Sur la base des hypothèses faites, les modélisations effectuées par l'IRSN montrent la possibilité du passage d'un panache de pollution dans la zone 1, y compris dans sa partie nord. Les teneurs en uranium calculées pour l'eau de la nappe sont comparables à celles observées actuellement dans la zone 1.

3.3.4.4 Conclusion des études de modélisation hydrogéologique

Les modélisations réalisées par ANTEA montrent qu'une pollution par l'uranium affectant la Gaffière et le Lauzon ne conduit à des teneurs élevées dans la nappe alluviale que dans le secteur de la nappe alluviale situé au sud de la confluence entre la Mayre Girarde et la Gaffière. Ce secteur ne correspond pas avec l'ensemble de la zone 1 dont une partie s'étend plus au nord.

L'IRSN a effectué des modélisations destinées à tester des hypothèses complémentaires à celles considérées par ANTEA. Il s'agissait en particulier de mieux prendre en compte l'évolution des conditions locales (prise en compte des seules gravières existantes dans les années 1980) et l'évolution au cours du temps de la concentration en uranium dans la Gaffière et dans le Lauzon ainsi que de tester l'influence du Grand Beal. Sur la base de ces hypothèses, les modélisations montrent la possibilité du passage d'un panache de pollution dans la zone 1, y compris dans sa partie Nord. Les teneurs en uranium calculées dans l'eau de la nappe sont comparables à celles observées actuellement dans la zone 1.

Si les résultats de ces deux modélisations diffèrent quant à l'extension de la zone affectée, en raison de différences dans les hypothèses retenues, ils démontrent tous deux la possibilité d'un transfert de l'uranium de la Gaffière et du Lauzon vers la nappe alluviale située au sud du site du Tricastin. Par ailleurs, ils prédisent dans les deux cas des concentrations en uranium dans la nappe assez proches de celles observées actuellement.

3.3.5 SYNTHÈSE SUR L'HYPOTHÈSE D'UNE ORIGINE LIÉE AU SITE NUCLEAIRE

Les principaux incidents ayant pu conduire à des contaminations de la nappe alluviale sous le site nucléaire du Tricastin sont assez bien identifiées dans l'ensemble. Ils ont principalement concerné l'INBS AREVA NC, COMURHEX, EURODIF et SOCATRI. Cependant, il existe peu d'informations permettant d'apprécier les conséquences de ces incidents sur la nappe alluviale. En particulier, il existe peu de données facilement accessibles permettant de suivre, en un même point du site ou de l'environnement, l'évolution de la teneur en uranium et de sa composition isotopique au cours des quarante dernières années.

La plupart des données disponibles proviennent du rapport « Guillaumont » [41]. La seule chronique de teneur en uranium dans les eaux disponible sur une longue période (1964-2010) concerne la concentration annuelle moyenne en uranium du Lauzon. L'examen de cette chronique

montre que la concentration en uranium dans cette rivière a continuellement dépassé 10 µg/L entre 1974 et 1984 avec un pic à 28 µg/L en 1979. Il peut ainsi être estimé qu'environ 2 tonnes d'uranium ont transité dans la Gaffière et dans le Lauzon durant cette période. Ces teneurs élevées en uranium sont imputables sans ambiguïté à des rejets accidentels sur le site durant cette période. Les données disponibles sur le site montrent, par exemple, qu'au cours de la période 1976-1979, les concentrations en uranium mesurées dans l'eau de la nappe phréatique au droit du site COMURHEX variaient de 100 µg/L à 1000 µg/L et ont dépassé localement les 5000 µg/L.

Les activités industrielles actuelles et passées du site nucléaire du Tricastin ont donc marqué et continuent de marquer la nappe sous le site nucléaire à la fois avec de l'uranium naturel et de l'uranium enrichi (rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ compris entre 0,74 et 1,6 %). Les rapports $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mesurés en 2008 et 2009 dans l'eau de la nappe au sud du site montrent une composition isotopique proche de celle de l'uranium naturel. Aucun des points de mesure ne présente de composition isotopique dénotant un enrichissement significatif.

Il existe très peu de données historiques concernant des mesures d'isotopie de l'uranium dans l'eau de la nappe ou la Gaffière, sur le site et dans l'environnement. Les seules données disponibles concernent les années 1977 et 1979. Les incohérences relevées sur ces données isotopiques ne permettent pas de tirer de conclusion sur les niveaux d'enrichissement de l'uranium présent dans la nappe à cette époque. L'étude de l'isotopie de l'uranium ne permet donc pas d'établir de lien indiscutable entre le site nucléaire et les concentrations élevées en uranium observées actuellement dans la nappe. Cependant, en l'absence d'information sur les proportions relatives d'uranium naturel et d'uranium enrichi qui ont pollué la nappe sous le site nucléaire notamment pendant la période 1974-1984, l'hypothèse d'une contribution importante des activités mettant en œuvre de l'uranium naturel sur le site nucléaire au marquage de la nappe ne peut pas être écartée.

Afin d'approfondir cette hypothèse, des travaux ont été conduits afin d'examiner les possibilités de cheminement de l'eau de la nappe depuis le site nucléaire vers les zones 1 et 2. Pour ce qui concerne la zone 2, les données hydrogéologiques permettent de conclure que le site nucléaire n'est pas à l'origine du marquage en uranium de la nappe alluviale observé dans cette zone.

L'étude de la possibilité d'un transfert d'eau, et donc d'uranium, de la Gaffière et du Lauzon vers la zone 1 a nécessité le recours à des modélisations hydrogéologiques. Les modélisations effectuées par ANTEA et par l'IRSN ont démontré la possibilité d'un transfert de l'uranium de la Gaffière et du Lauzon vers la nappe alluviale située au sud du site du Tricastin. Par ailleurs, elles ont prédit dans les deux cas des concentrations en uranium dans la nappe assez proches de celles observées actuellement. La seule divergence entre les deux modélisations, imputable au choix des phénomènes pris en compte et des hypothèses associées, réside dans la localisation de la zone impactée. Les résultats d'ANTEA montrent que la pollution ancienne de la Gaffière et du Lauzon n'aurait pu affecter que la partie de la nappe alluviale située au sud de la confluence entre la Mayre Girarde et la Gaffière, ce qui ne correspond pas avec l'ensemble de la zone 1 dont une

partie s'étend plus au nord. Ceux de l'IRSN ont, par contre, montré la possibilité du passage d'un panache de pollution dans la zone 1, y compris dans sa partie nord.

En conclusion, pour l'IRSN, l'ensemble des données et résultats, basés d'une part sur des observations passées et actuelles, d'autre part sur des simulations, constituent un faisceau d'éléments permettant, en l'état actuel des connaissances, d'étayer l'hypothèse d'une origine liée au site nucléaire pour les valeurs plus élevées en uranium observées dans la nappe alluviale dans la zone 1. Plus précisément, ces valeurs seraient la conséquence d'incidents ayant conduit à des pollutions, par de l'uranium, de la nappe alluviale sous le site nucléaire durant la période 1974-1984. La nappe alluviale étant drainée par la Gaffière au niveau de la partie nord du site nucléaire, l'uranium aurait migré dans celle-ci, conduisant à des teneurs continuellement élevées en uranium (supérieures à 10 µg/L) dans le Lauzon, comme cela est attesté par les observations faites dans le Lauzon au cours de cette période. L'alimentation de la nappe alluviale par le système Gaffière-Lauzon à partir du sud du lac Trop Long aurait alors permis le transfert d'uranium dans la nappe, au sud du site nucléaire du Tricastin, pendant une dizaine d'années. Ce transfert continu d'uranium dans la nappe aurait alors conduit à la formation d'un panache de pollution qui se déplacerait, dans le sens d'écoulement de la nappe (c'est-à-dire vers le sud-est), à une vitesse de l'ordre de quelques dizaines de mètres par an. La zone 1 représenterait alors la position actuelle de ce panache.

4 COMMENTAIRES DES MEMBRES DU GROUPE DE SUIVI

Sont rapportés ci-après les commentaires recueillis par l'IRSN auprès des membres du groupe de suivi, à propos du déroulement de l'étude et des conclusions tirées par l'IRSN, telles que présentées dans le chapitre précédent.

4.1 DELEGUE A LA SURETE NUCLEAIRE DE DEFENSE (DSND)

4.1.1 COMMENTAIRES SUR LE FOND

Le DSND considère que le travail effectué par les responsables du groupe de suivi est de très grande qualité. Cependant les interprétations finales souffrent d'incertitudes résultant du manque de certaines données du passé. Ce point a été noté par l'ensemble des participants à ce travail. Cela ne remet pas en cause l'utilité du travail effectué.

La remarque principale du DSND est que l'on a souvent tendance à porter des jugements sur les actions du passé avec la réglementation d'aujourd'hui. Ce point aurait mérité d'être souligné. Les exemples sont fournis pour illustrer le propos :

1. La réglementation applicable en matière de seuils de référence concernant les rejets radioactifs ou chimiques est constituée des arrêtés suivants :
 - de 1966 à 2005 : arrêté préfectoral n° 2542 du 24 juin 1966 ;
 - de 2005 à 2008 : arrêté ministériel du 22 août 2005 ;
 - depuis 2008 : arrêté ministériel du 16 avril 2008.
2. Les recommandations de l'OMS sur la potabilité des eaux de boisson n'existaient pas à l'origine des activités du site. On notera qu'un certain nombre de sites en France comportent des nappes avec des teneurs en uranium très supérieures à la recommandation de l'OMS de 15 µg/l et bien au-delà des valeurs mesurées dans la nappe du Tricastin.
3. La réglementation sur le stockage définitif des déchets par l'ANDRA n'existait pas lors de l'entreposage des barrières dans la butte, et l'ANDRA n'existait pas.

4.1.2 COMMENTAIRES SUR LE FONCTIONNEMENT ET LE DEROULEMENT DES TRAVAUX

Le DSND considère que les travaux ont été réalisés dans un contexte positif de la part de tous les acteurs du groupe de suivi. Le seul écueil a été d'éviter de vouloir démontrer coûte que coûte une perception « a priori » de l'origine du marquage de la nappe par l'uranium : à titre d'illustration, la reprise du modèle de calcul d'ANTEA par l'IRSN aurait pu apparaître comme voulant absolument ramener la possibilité de pollution par le site dans la zone 1.

4.2 LABORATOIRE DEPARTEMENTAL D'ANALYSE DE LA DROME (LDA26)

Le LDA 26 note que de nombreuses mesures ont été effectuées dans de bonnes conditions (avec des prélèvements conformes aux règles de l'art permettant leur interprétation), que deux études hydrologiques particulièrement documentées ont été conduites par ANTEA à la demande d'AREVA et par l'IRSN, et qu'une bibliographie riche a été réalisée par AREVA qui a produit des archives intéressantes. Il considère qu'un travail important a été réalisé dans une volonté de collaboration et de transparence avec un vrai souci de la part de tous les participants d'établir l'origine du marquage en se fondant sur des éléments fiables et acceptés par tous. Tous ces éléments sont consignés et seront mis à la disposition du public, ce qui constitue une avancée significative.

Pourtant, les conclusions relèvent plus de la présomption et de la conviction, malgré la rigueur de la démarche entreprise.

L'interprétation de l'IRSN est fondée sur l'analyse des données historiques disponibles, des résultats des mesures collectées depuis le début des travaux du groupe de suivi et de l'étude hydrodynamique de la nappe phréatique.

Les données d'analyses ne sont réellement fournies que depuis peu de temps (début de l'étude IRSN en 2007). Elles sont en revanche très maigres pour le demi-siècle qui précède : en dehors du rapport « Guillaumont » présentant des données ponctuelles concernant 1976, 1977 et 1979, il faut en effet attendre les années 2000 pour avoir un suivi plus consistant des différents paramètres. A cet égard, le LDA 26 rappelle que l'industrie nucléaire est un des premiers secteurs d'activité où une politique d'assurance qualité, dont la traçabilité constitue un axe vertébral, a été mise en œuvre. Il considère que le Groupe de Suivi s'est étonné en vain de la quasi absence de mesures notamment dans les périodes qui ont suivi chacun des accidents survenus chez les différents exploitants et qui auraient beaucoup apporté.

Le site et ses abords ont connu dans leur histoire une hydrologie très variable du fait de l'action des exploitants :

- création du site et sa mise à sec ;
- construction de barrières souterraines et de pompages sous certaines installations (visant justement à éviter la diffusion dans la nappe à l'extérieur des enceintes de certaines entreprises) ;
- pompage massif en 1980 réalisé afin de limiter la diffusion d'uranium provenant des barrières de diffusion gazeuse enterrées dans la butte sur le site ;
- à la suite de plusieurs incidents ou accidents qui ont émaillé la vie du site depuis 50 ans et qui ont motivé à chaque fois la mise en place de pompages sur plusieurs lieux géographiques et de rejets dans le canal.

Il apparaît impossible de définir un seul modèle de l'hydrologie du site établi à partir de données hydrographiques actuelles.

D'ailleurs les études ANTEA et IRSN fondées toutes deux sur des données actuelles mais des hypothèses différentes, divergent déjà dans leurs conclusions. Le LDA 26 estime que s'appuyer sur ces études pour comprendre le passé apparaît illusoire et que malgré la bonne volonté des participants, le groupe n'a pas abouti à des certitudes fondées scientifiquement.

Mais le plus important n'est-il pas de conclure sur le risque sanitaire encouru par les populations locales? Ont-elles consommé une eau plus contaminée qu'actuellement et pendant combien de temps, et dans cette éventualité quel est le risque pour leur santé? Enfin que préconiser pour l'avenir?

C'est d'ailleurs la demande qui émane du groupe de travail interne à la CLIGEET dédié à cette étude.

Le LDA 26 indique que seul le maintien d'un plan de surveillance intéressant les points suivis pendant l'étude permettra de confirmer ou d'infirmer les hypothèses formulées. En effet, une pollution d'origine géologique devrait montrer une grande stabilité dans le temps futur et rassurer sur le passé. Une pollution provoquée par le site nucléaire devrait *a contrario* se déplacer à une vitesse qu'il reste à établir. C'est la seule qui soit préoccupante et de la cinétique qui sera observée devrait pouvoir être déduit le cheminement passé.

Le LDA 26 estime que le risque sanitaire est lié au caractère probablement prolongé d'une exposition à de faibles doses, proches de la limite fixée par l'OMS. L'effet sanitaire des faibles doses est le domaine d'intérêt du prochain Pôle d'écotoxicologie environnementale de Rovaltain auquel pourrait être confiée une telle étude.

Enfin, le LDA 26 se félicite de l'ambiance cordiale que l'IRSN a su maintenir dans le pilotage de ce groupe de travail, confronté à un objectif de résultat ambitieux.

4.3 ANALYSE D'AREVA SUR LES RESULTATS ACQUIS DANS LE CADRE DE L'ETUDE

La plaine du Tricastin n'a pas fait l'objet d'une étude de caractérisation géochimique avant la création du site nucléaire (point zéro). Après la mise en évidence au Sud du site de valeurs en uranium plus élevées que le fond géochimique local connu, AREVA avait invité, début 2007, les DDASS de Drôme et de Vaucluse et l'IRSN à participer à une étude pour caractériser les eaux de la nappe alluviale au sud du site du Tricastin. Les résultats de ces investigations ont été présentés à la CLIGEET le 4 juillet 2008.

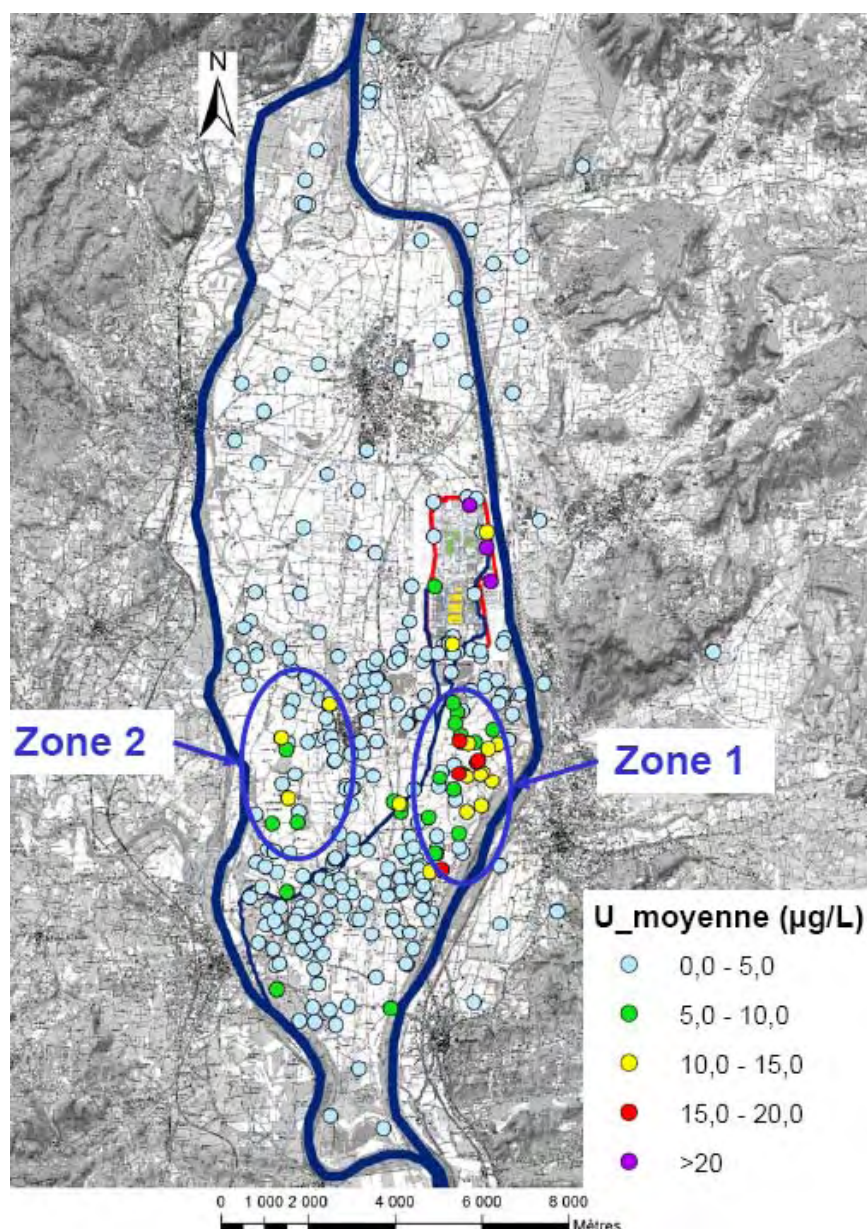
La poursuite de l'étude a été confirmée lors de la CLIGEET du 21 novembre 2008 avec deux nouveaux objectifs : avoir une vue complète de l'étendue de l'anomalie et tenter d'en déterminer l'origine. Le groupe de suivi, dont la constitution avait été arrêtée à cette même réunion, a parfaitement joué son rôle.

Les travaux menés lors de cette seconde phase d'étude ont permis d'avoir une vision beaucoup plus complète des teneurs dans les eaux de nappe en uranium et pour de nombreuses autres substances mises en œuvre ou non sur le site AREVA. L'étude a permis de confirmer l'existence d'une seconde zone présentant des teneurs en uranium atypiques.

Que ce soit dans la zone 1 ou dans la zone 2, les caractéristiques isotopiques de l'uranium sont celles de l'uranium naturel. Sur les ouvrages où nous avons maintenant trois années de recul, on constate que les teneurs en uranium n'ont pas réellement évolué.

Dans les deux zones, des forages à faible teneur voisinent avec des forages à teneur élevée.

En tant qu'industriel responsable, AREVA a voulu comprendre l'origine de ces teneurs atypiques. Le caractère pluraliste des travaux, qu'AREVA a apprécié, l'amène à émettre quelques réserves sur les conclusions du rapport auquel il souhaite apporter ci-après des éléments complémentaires qui lui semblent devoir y figurer.



Les trois hypothèses susceptibles d'expliquer l'origine de l'uranium mesuré dans la nappe ont été examinées par le groupe de suivi mais l'essentiel de l'étude a été consacré à rechercher un lien entre le site et le phénomène observé.

L'hypothèse géologique

La zone située à l'ouest / sud-ouest du site (zone 2) ne présente pas de relations hydrogéologiques avérées avec le site. Les membres du groupe de suivi se sont donc accordés, lors de la réunion de la CLIGEET de novembre 2009, à considérer que les teneurs en uranium de l'eau de la nappe résultent probablement d'échanges entre l'eau de la nappe alluviale et de l'uranium présent dans les sédiments, lignites ou autres roches, puisque certains forages sont situés en amont de la zone où des lignites ont été mis en évidence. A noter qu'au nord du Vaucluse, des teneurs en uranium supérieures à 20 µg/L ont été mesurées dans des eaux de nappe à proximité de mines de lignite.

Les deux sondages de sol menés dans la zone 1 ont mis en évidence, à la base de la nappe, des roches sédimentaires présentant des concentrations en uranium et en phosphates respectivement de 10 fois à 3 fois plus élevées que les teneurs du bruit de fond local. Ces deux sondages ne sont cependant pas suffisants pour affirmer que ces roches sont seules responsables des teneurs mesurées en nappe. *A contrario*, ces deux sondages étudiés, sur une zone de 800 hectares ne permettent pas davantage d'écarter, comme pour la zone plus à l'ouest, une origine naturelle.

L'hypothèse industrielle et artisanale

Le secteur autour de Bollène-Mondragon a connu le développement sur plus d'un siècle d'une importante activité de briqueterie et d'extraction de lignites. Les ouvrages décrivant l'histoire de la région relatent la valorisation des cendres de briqueterie et des lignites comme amendement des sols (fertilisant). Les mâchefers générés par la combustion du lignite concentrent l'uranium contenu dans cette roche combustible. Ces mâchefers ont parfois été utilisés comme éléments de construction (cela est d'ailleurs encore visible dans des murets autour de certaines habitations de Bollène-La Croisière).

Une contribution du lessivage de ces cendres et mâchefers dans le secteur des briqueteries de Bollène-La Croisière est donc plausible.

Néanmoins, la traçabilité de ces épandages, tout comme celle de l'utilisation d'engrais phosphatés qui présentent aussi des teneurs en uranium substantielles, est insuffisante pour attribuer indubitablement les valeurs atypiques constatées à ces origines anthropiques.

L'hypothèse liée aux activités nucléaires du site AREVA du Tricastin

Elle ne concerne donc que la zone 1 mise en évidence dès 2007. L'hypothèse reposait sur le fait que :

- le site met aussi en œuvre de l'uranium naturel donc d'une composition identique à celle des eaux des forages,
- les activités historiques du site ont généré un marquage des sols sur une partie du site qui a conduit à un marquage de la Gaffière,
- celle-ci peut assurer le transport de l'uranium jusqu'au Lauzon dont une partie des eaux s'infiltrer en nappe. L'uranium progresserait alors à raison de quelques dizaines de mètres par an vers la zone où s'observent aujourd'hui les valeurs atypiques. L'origine du marquage, si elle était démontrée, ne peut donc pas être récente et remonterait à plusieurs dizaines d'années. Ce cheminement apparaît comme le seul possible entre le site et la zone 1 compte tenu de la distance qui les sépare.

L'action des eaux de pluie sur la butte où ont été enfouies des barrières ainsi que des pertes d'étanchéité d'ouvrages des anciennes usines chimiques de Pierrelatte ont conduit à une augmentation de la concentration en uranium de la nappe entre la butte et la Gaffière. Celle-ci drainant vers elle la nappe alluviale, les eaux de la Gaffière ont présenté une teneur moyenne annuelle supérieure à 10 µg/L dans les années 1974 à 1984 avec un maximum à 28 µg/L en 1980.

Ces faits ne semblent cependant pas pouvoir démontrer irréfutablement l'origine de ce terme source dans les valeurs observées. En effet :

- Si peu de valeurs ont été retrouvées sur les caractéristiques isotopiques du marquage de la nappe au droit du site et de la Gaffière, **les mesures disponibles montrent cependant que le marquage était dû à de l'uranium enrichi à une isotopie parfaitement discriminable de l'uranium naturel.** Ce constat est cohérent avec les dispositions prises en 1980 pour limiter l'impact de la butte sur la Gaffière (pompage au sud de la butte). Bien que très affaiblie aujourd'hui, l'influence de la butte est toujours décelable sur la signature isotopique et rien ne permet de croire qu'il existât une période où ce ne fut pas le cas.

Ce terme source ne paraît donc pas pouvoir être à l'origine du phénomène constaté en zone 1.

- Les études hydrogéologiques réalisées par ANTEA montrent que le secteur nord de la zone 1, où s'observent les valeurs les plus élevées, ne peut pas avoir été atteint par un cheminement des eaux en provenance de la Gaffière ou du Lauzon car il en est protégé par le canal du Grand Béal créé antérieurement au site. L'étude de l'IRSN qui a modélisé la plaine sans ce canal, a de fait confirmé le rôle essentiel de ce canal dans ce secteur nord. L'alimentation en eau de ce secteur est seulement assurée par le Grand et le Petit Béal à partir des eaux du contre-canal CNR.

L'apport d'eau de ces canaux exerce aussi une dilution importante des eaux venant du Lauzon dans le secteur sud de la zone.

Les études ANTEA montrent en outre que, même sous l'influence d'une alimentation par le Lauzon, les teneurs en nappe seraient restées à des niveaux inférieurs à ceux mesurés sur de nombreux puits de la zone 1. L'écart est encore plus important pour le secteur de Bollène-La-Croisière.

Ainsi, les conditions hydrogéologiques ne permettent pas d'expliquer le phénomène observé ni dans son étendue, ni dans les concentrations mesurées, ni dans la disparité des concentrations entre puits proches.

Les recherches menées n'ont pas permis de mettre en évidence un terme source possible en provenance du site AREVA qui corresponde à l'isotopie mesurée sur les forages de la zone où les valeurs les plus élevées sont observées.

Les études hydrogéologiques n'ont pas permis de démontrer irréfutablement le cheminement entre le site et le secteur de la zone 1 le plus marqué.

Dans l'état actuel des connaissances, il ne paraît donc pas possible d'expliquer les valeurs atypiques de la zone 1 par les activités du site, même très anciennes, et d'écarter totalement une origine identique à celle de la zone 2.

Perspectives :

L'ensemble des travaux menés à ce jour, malgré les moyens importants qui y ont été consacrés, montre que le dossier est très complexe, dès lors que les paramètres à prendre en compte sont nombreux et que les études réalisées ont montré l'existence d'un contexte local très particulier, au plan à la fois hydrologique, géologique et historique.

Les valeurs mesurées sur les eaux de forage de la zone 1 ne semblent pas évoluer depuis que leur contrôle a été mis en place. Sur certains puits, l'historique remonte à trois années. AREVA se propose donc de poursuivre la surveillance des eaux de nappe de la plaine. Le suivi de la zone 1 permettra de confirmer ou d'infirmer son déplacement vers le sud-est, ce qui serait caractéristique d'une origine anthropique. AREVA présentera annuellement le bilan de cette surveillance en CLIGEET.

Le groupe de suivi pourrait décider d'une expertise sur les études réalisées par un organisme comme le BRGM, pour disposer d'un tiers avis sur les méthodologies suivies et les conclusions des études hydrologiques réalisées dans le cadre de cette étude.

4.4 ARS RHONE-ALPES - ARS PACA - CIRE INVS

L'étude sur l'origine du marquage par l'uranium dans la nappe alluviale de la plaine du Tricastin a permis d'analyser de façon très précise les teneurs en uranium de la nappe autour du site du Tricastin.

Deux zones présentent des teneurs en uranium supérieures au bruit de fond local : la zone 1, au sud du site du Tricastin, et la zone 2, au sud-ouest du site. Dans la zone 2, les teneurs restent en deçà de la valeur-guide de l’OMS (fixée à 15 µg/l) alors que celle-ci est parfois dépassée en quelques points de la zone 1. A la suite de la campagne de mesures réalisée en 2007, tous les habitants de cette zone ont été raccordés au réseau public d’eau potable, qui ne présente pas les mêmes risques quant à la présence d’uranium dans l’eau. Ainsi, cette nouvelle étude a permis de confirmer que toutes les mesures de gestion appropriées ont été prises à ce jour, et qu’il ne subsiste plus de situation à risque.

En ce qui concerne l’origine de la présence de l’uranium dans la nappe, il apparaît que dans la zone 2, une origine géologique des teneurs en uranium dans l’eau ne peut pas être exclue ; et dans la zone 1, où les valeurs sont les plus fortes, un faisceau d’éléments permet de privilégier l’hypothèse d’un marquage de la nappe du Tricastin par de l’uranium en relation avec des incidents survenus sur le site nucléaire entre 1974 et 1984, qui ont conduit au déversement évalué globalement à 2 tonnes, d’uranium dans l’environnement.

Une des conséquences de ces conclusions est que les habitants de la zone 1, de l’ordre d’une centaine de personnes de la commune de Bollène (Vaucluse), ont potentiellement pu être exposés à des concentrations en uranium dans l’eau qu’ils consommaient supérieures à la valeur guide de l’OMS, depuis l’année 1974 au plus tôt, jusqu’à 2008 au plus tard, date à laquelle les raccordements au réseau public d’eau potable ont été réalisés.

L’AFSSA, dans son avis du 13 janvier 2010 relatif à la détermination d’une exigence de qualité en uranium pondéral dans les eaux destinées à la consommation humaine, estime que « la consommation sur une longue durée d’une eau présentant une concentration supérieure à 15 µg/L n’apparaît pas, en l’état actuel des connaissances, acceptable pour la santé des consommateurs. »

C’est pourquoi, l’Agence Régionale de Santé PACA a saisi l’Institut de Veille Sanitaire à l’issue des travaux du groupe de travail afin qu’il apporte son concours à la réalisation d’une évaluation des risques sanitaires présentés par cette situation passée, et qu’une information adaptée puisse être donnée aux habitants concernés.

4.5 UNION DEPARTEMENTALE CFDT 26/07

Monsieur Georges Le Dinahet, pour l’Union Départementale CFDT 26/07, indique : « *J’ai participé aux travaux du groupe de travail pas aussi souvent que je le souhaitais, néanmoins j’ai remarqué que l’esprit d’ouverture, la transparence étaient de règle pendant la durée de nos travaux* ».

« *A l’issue de ces travaux, la CFDT pose la question : Et maintenant qu’est-ce que l’on fait de cette étude ? Quel suivi ? Quel a été l’impact sanitaire sur les salariés ? Par exemple* ».

5 CONCLUSION GENERALE

L'étude menée de janvier 2009 à mai 2010 par l'IRSN, les ARS de Vaucluse et de la Drôme et par AREVA avait pour objectif d'identifier l'origine des teneurs relativement élevées en uranium observées en 2007 et 2008 dans la nappe alluviale au sud du site nucléaire du Tricastin.

Dès le début de l'étude, les quatre partenaires ont souhaité que les travaux, qui ont porté sur une nappe alluviale largement utilisée par les habitants de la plaine du Tricastin, se déroulent dans la plus grande transparence et ont ainsi proposé à la CLIGEET que soit créé un Groupe de Suivi impliquant des représentants des différents collèges de cette dernière. Au cours des 8 réunions qui se sont tenues entre février 2009 et mai 2010, les différentes parties prenantes ont ainsi eu l'occasion de faire des propositions pour améliorer le plan d'étude proposé par l'IRSN, les DDASS et AREVA, d'être informées et de discuter des résultats de l'étude au fur et à mesure de son avancement, de faire des propositions en termes de localisation et de nature des mesures dans les eaux de nappe et enfin d'exprimer leur appréciation sur la restitution de l'étude par l'IRSN, tant en ce qui concerne la méthode de travail utilisée que l'interprétation des résultats. Par ailleurs, l'avancée des travaux a fait l'objet de présentations régulières devant la CLIGEET. De manière générale et comme l'attestent les commentaires regroupés au sein du chapitre 4 du présent rapport, les membres du Groupe de Suivi qui se sont exprimés ont tous souligné d'une part leur intérêt à suivre ce type d'étude, d'autre part la qualité du dialogue qui s'est instauré au sein du Groupe de Suivi.

La diversité des sujets abordés dans le cadre de l'étude (géologie, hydrogéologie, géochimie, métrologie des éléments stables et radioactifs...) ainsi que la complexité des phénomènes étudiés ont nécessité un effort pédagogique important de la part des experts en charge de ces travaux afin que l'ensemble des membres du Groupe de Suivi puissent s'approprier au mieux la démarche et devenir ainsi acteurs de la définition, de la réalisation et de la restitution des résultats des différentes actions engagées. L'un des enseignements des travaux de ce Groupe de Suivi est que la réussite d'un tel groupe est étroitement liée à la capacité des experts à pouvoir rendre accessibles au plus grand nombre des notions scientifiques complexes.

D'un point de vue technique, l'étude a été décomposée en deux phases :

- une première phase, descriptive, qui s'est attachée d'une part à préciser le fonctionnement de la nappe alluviale du Tricastin, d'autre part à obtenir une cartographie de la teneur en uranium de l'eau de la nappe dans la plaine du Tricastin ;
- une seconde phase, analytique, qui a été consacrée à tester trois hypothèses possibles quant à l'origine des concentrations plus élevées observées au sud du site nucléaire du Tricastin.

Les principaux résultats de la première phase de l'étude sont les suivants :

Fonctionnement de la nappe alluviale du Tricastin : des campagnes de mesures hydrogéologiques et hydrologiques effectuées en mars 2009 ont permis d'améliorer la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale du Tricastin et de préciser ses relations avec les eaux de surface. On retiendra principalement que :

- au nord du site nucléaire, la nappe alluviale du Tricastin est alimentée par le canal de Donzère-Mondragon et s'écoule vers le sud-ouest ;
- au sud du site nucléaire, la nappe alimente le canal de Donzère-Mondragon et s'écoule vers le sud-est en moyenne ;
- la Gaffière draine l'eau de la nappe de la partie nord du site nucléaire ; en revanche, plus au sud, le Lauzon, qui résulte de la confluence de la Mayre-Girarde et de la Gaffière, alimente la nappe ;
- en moyenne, l'eau de la nappe s'écoule à une vitesse de l'ordre de quelques mètres par jour tandis que l'uranium se déplace environ 60 fois plus lentement.

Cartographie de la teneur en uranium de la nappe : plus de 380 prélèvements d'eau de nappe ont été effectués à la fois sur le site nucléaire du Tricastin et dans son environnement, pour en mesurer la teneur en uranium. L'examen de la répartition spatiale des teneurs en uranium dans la nappe montre que :

- moins de 1,5% des points de mesures présentent des concentrations en uranium supérieures à la valeur-guide pour les eaux de boisson de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est de 15 µg/L ;
- environ 90% des points montrent des concentrations en uranium inférieures à 5 µg/L ;
- les points présentant des teneurs en uranium supérieures à 5 µg/L se répartissent, dans leur grande majorité, dans deux zones : l'une localisée directement au sud du site nucléaire -elle contient la totalité des points identifiés en 2007 et 2008 (zone 1 - commune de Bollène)-, l'autre située au sud-ouest du site nucléaire (zone 2, commune de Lapalud) ;
- les points présentant les teneurs les plus importantes en uranium se trouvent sur le site nucléaire (3 points dépassent 20 µg/L).

Dans sa seconde phase, l'étude a testé différentes hypothèses possibles quant à l'origine des concentrations plus élevées en uranium observées dans les zones 1 et 2. Les membres du Groupe de Suivi se sont accordés sur le fait de considérer les trois hypothèses suivantes :

- **Hypothèse d'une origine en relation avec la géologie locale** : les formations géologiques en contact avec l'aquifère et présentant des teneurs relativement élevées en uranium seraient, dans cette hypothèse, à l'origine des concentrations élevées en uranium dans l'eau de la nappe. Il existe en effet au droit de la zone d'étude des formations géologiques susceptibles de libérer des quantités d'uranium significatives dans les eaux souterraines.

- **Hypothèse d'une origine en relation avec des activités anthropiques autres que celles mises en œuvre sur le site nucléaire du Tricastin** : les teneurs élevées en uranium observées seraient, dans cette hypothèse, la conséquence de la mise en œuvre, actuelle ou passée, d'activités humaines conduisant à la manipulation et la dissémination de matériaux ou substances contenant de l'uranium.
- **Hypothèse d'une origine en relation avec les activités passées ou actuelles du site nucléaire du Tricastin** : depuis sa création dans les années soixante, l'activité du site nucléaire du Tricastin a été marquée par quelques situations accidentelles qui ont conduit à des rejets d'uranium, lesquels ont eu pour conséquence un marquage des sols et donc une pollution de la nappe phréatique sous-jacente. L'examen de cette hypothèse visait à étudier la possibilité d'un cheminement de l'uranium depuis la nappe sous le site nucléaire du Tricastin jusqu'aux zones 1 et 2.

L'examen de ces trois hypothèses pour les zones 1 et 2 conduit aux conclusions suivantes :

1) *Zone 1 (secteur de Bollène) :*

- **Hypothèse géologique** : L'ensemble des données disponibles (cartographie géologique et sondages) montre que, au droit de la zone 1, la formation géologique au contact de la nappe sous les alluvions est constituée de marnes plaisanciennes. Les teneurs en uranium de ces roches sont comprises entre 1 mg/kg et une dizaine de mg/kg, soit les teneurs attendues dans des roches sédimentaires. Pour ce qui concerne les alluvions, il apparaît peu probable que d'éventuels placers, constitués de minéraux lourds très peu altérables, relarguent suffisamment d'uranium pour être à l'origine des concentrations plus élevées observées dans l'eau de la nappe dans la zone 1. En l'état actuel des connaissances, il n'existe donc pas d'évidence permettant de démontrer que les formations géologiques identifiées dans la zone 1 peuvent conduire à des teneurs en uranium dans la nappe supérieures à celles qui sont observées régionalement (de l'ordre de quelques µg/L).

- **Hypothèse d'une influence des activités anthropiques autre que celles mises en œuvre sur le site nucléaire du Tricastin** : Le secteur de Bollène/Mondragon a connu entre le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècle, le développement d'une activité importante d'extraction de lignites et de briqueterie utilisant des fours à lignites. Ces activités ont généré des cendres et des mâchefers riches en uranium qui ont pu être utilisés comme amendements des sols. En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'élément montrant que la zone 1 ait pu, durant les XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, faire l'objet d'une pratique particulière en termes d'amendements qui ait pu conduire à un lessivage de l'uranium de ces derniers et à une augmentation de la teneur en uranium dans la nappe encore visible aujourd'hui. Par ailleurs, la consultation de la base BASIAS (BRGM - MEEDDM) qui recense les sites industriels mettant, ou ayant mis en œuvre, des matériaux

contenant naturellement des radionucléides, n'a pas montré la présence de telles industries dans la zone 1, à l'exception d'un secteur près de Bollène-La Croisière situé à l'extrémité sud de la zone. De manière générale, il n'existe pas d'éléments permettant d'étayer l'hypothèse d'une influence des activités anthropiques autres que celles mises en œuvre sur le site nucléaire du Tricastin sur les teneurs élevées en uranium observées dans l'eau de la nappe dans la zone 1.

- **Hypothèse d'une origine en relation avec les activités passées ou actuelles du site nucléaire du Tricastin.** Alors que, depuis 1964, plusieurs situations accidentelles répertoriées ont conduit à des pollutions du sol du site nucléaire du Tricastin, il existe très peu de données accessibles permettant de caractériser l'impact de ces événements (mesures des teneurs en uranium dans la nappe après l'incident, composition isotopique des rejets, évaluation de la masse d'uranium transférée à la nappe...). Il s'agit de la principale difficulté à laquelle s'est heurté l'examen de cette hypothèse.

Les données disponibles ont cependant permis de montrer qu'entre 1974 et 1984, environ 2 tonnes d'uranium ont transité dans la Gaffière et le Lauzon, l'eau de ces cours d'eau ayant alors présenté, de manière continue au cours de cette période, des teneurs annuelles moyennes supérieures à 10 µg/L. L'étude hydrogéologique a permis de montrer que l'observation de ces teneurs élevées dans la Gaffière est attribuable, sans ambiguïté, aux rejets accidentels survenus sur le site nucléaire durant cette période car, dans la partie nord du site nucléaire, la Gaffière draine les eaux de nappe directement affectées par ces rejets. L'étude hydrogéologique a par ailleurs montré que, plus au sud, le système de rivières Gaffière-Lauzon alimente la nappe en direction du canal de Donzère-Mondragon.

Le transfert d'uranium à partir de l'ensemble de ce système Gaffière-Lauzon vers la nappe est confirmé aussi bien par les modélisations mises en œuvre par ANTEA et que celles de l'IRSN. Les modélisations effectuées par l'IRSN, qui tiennent en particulier compte de l'évolution du système hydrographique (création de lacs), de l'évolution de la teneur en uranium dans la Gaffière au cours du temps et de la vitesse de transfert de l'uranium dans la nappe, permettent d'expliquer, tant en localisation qu'en valeurs des teneurs en uranium dans la nappe, les observations effectuées dans la zone 1.

Ainsi, pour l'IRSN, l'étude a permis de montrer la possibilité d'un cheminement de l'uranium entre le site nucléaire du Tricastin et la zone 1 : l'uranium présent dans la nappe alluviale sous le site nucléaire du Tricastin a été transporté vers la Gaffière puis le Lauzon. Au sud du site, une partie des eaux de ces rivières s'infiltré dans la nappe en direction du canal de Donzère-Mondragon, dans un secteur correspondant à la zone 1. La très faible vitesse de migration de l'uranium dans la nappe (de l'ordre de 5 à 50 m/an) pourrait ainsi expliquer l'existence des teneurs élevées observées aujourd'hui dans la zone 1 qui serait la signature de rejets accidentels survenus sur le site nucléaire du Tricastin durant la période 1974-1984. Pour l'IRSN, l'ensemble de ces données et résultats, fondés d'une part sur des observations passées et actuelles, d'autre part sur des

modélisations, constituent un faisceau d'éléments permettant, en l'état actuel des connaissances, d'étayer l'hypothèse d'une origine liée au site nucléaire des valeurs plus élevées en uranium observées dans la nappe alluviale dans la zone 1. Ces valeurs seraient la signature d'incidents ayant conduit à des pollutions, par de l'uranium, de la nappe alluviale sous le site nucléaire durant la période 1974-1984.

Cette conclusion quant à l'origine des teneurs élevées en uranium observées dans la zone 1 n'est pas partagée par AREVA qui considère qu'il ne « *paraît pas possible d'attribuer les valeurs atypiques de la zone 1 aux activités du site, même très anciennes* », en se fondant d'une part sur des considérations de composition isotopique de l'uranium présent dans la nappe dans la zone 1, d'autre part sur le rôle hydraulique des canaux du Grand et du Petit Béal. Cette divergence d'appréciation, dont l'origine est principalement liée au faible nombre et au manque de fiabilité des données disponibles, en particulier pour la période 1974-1984, tant en ce qui concerne les conditions hydrogéologiques que les conséquences des rejets d'uranium dans la nappe sous le site nucléaire, est aussi le reflet de la complexité et de la diversité des phénomènes qui ont été étudiés dans le cadre des travaux du Groupe de Suivi.

A cet égard, la proposition faite par AREVA de mettre en place une surveillance sur le long terme des eaux de la nappe alluviale dans la plaine du Tricastin apparaît de nature à apporter des éléments d'appréciation concernant l'hypothèse d'une influence des activités passées du site nucléaire sur les teneurs en uranium observées dans l'eau de la nappe dans la zone 1.

2) Zone 2 (secteur de Lapalud/Lamotte-du-Rhône) :

L'étude hydrogéologique a permis de montrer qu'il n'existait pas de possibilité de cheminement de la nappe phréatique entre le site nucléaire du Tricastin et la zone 2, ce qui exclut l'hypothèse d'une influence du site nucléaire pour expliquer les teneurs élevées en uranium observées dans la nappe. De la même manière, il n'a pas été mis en évidence d'activité anthropique permettant d'expliquer ces teneurs. L'hypothèse la plus probable pour expliquer les observations effectuées dans la zone 2 est donc la présence locale de formations géologiques riches en uranium. Cette hypothèse est confortée par la présence au droit de la zone 2, à la base de la couche d'alluvions, d'une formation géologique d'âge Crétacé dont il a été mis en évidence, lors de l'étude, qu'elle était possiblement riche en uranium et que ce dernier était susceptible d'être relargué dans l'eau.

D'une manière générale, l'IRSN estime que les membres du Groupe de Suivi ont pu tirer profit des travaux réalisés, qui ont nécessité des ressources humaines, techniques et financières importantes de certains acteurs (IRSN, AREVA, DDASS, LDA26). L'ensemble des connaissances partagées durant cette étude, en particulier pour ce qui concerne la cartographie des teneurs en uranium dans la nappe ainsi que les relations entre la nappe alluviale de la plaine du Tricastin et les cours d'eau qui la parcourent, permettront ainsi une meilleure compréhension de tout évènement qui pourrait affecter à l'avenir la nappe du site nucléaire du Tricastin.

6 REFERENCES

1. Note Technique IRSN /DEI/SESURE/2008-06, 10/06/2008, "Radioactivité des eaux de forage autour du site de Tricastin-Pierrelatte"
2. World Health Organization, "Uranium in drinking water - Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality", WHO/SDE/WSH/03.04/118, 2005.
3. World Health Organization, "Guideline for Drinking-Water Quality : First Addendum to the Third Edition - Volume 1 : Recommendations", 2006.
4. World Health Organization, "Guideline for Drinking-Water Quality : Second Addendum to the Third Edition - Volume 1 : Recommendations", 2008.
5. Avis Afssa 13/01/2010, "Détermination d'une exigence de qualité en uranium pondéral dans les eaux destinées à la consommation humaine" (réponse à la saisine n° 2008-SA-0380)
6. Lettre du Directeur de Cabinet - Ministère de la Santé de la Jeunesse des Sports et de la Vie Associative CABII/FH/MP/D.08.8600, 17/07/2008
7. Lettre IRSN /DIR/2008-419, 23/07/2008, "Etablissement SOCATRI : Rejet accidentel d'uranium survenu dans la nuit du 7 au 8 juillet 2008 - Dispositif de surveillance élargi"
8. Lettre ASN Dép-Lyon-N°1041-2007, 21/07/2008, "Etat radiologique et chimique des eaux de la nappe alluviale du site de Tricastin"
9. Compte-rendu de la 1ere réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 02/02/2009.
10. Compte-rendu de la 2eme réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 12/03/2009.
11. Compte-rendu de la 3eme réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 16/06/2009.
12. Compte-rendu de la 4eme réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 06/10/2009.
13. Compte-rendu de la 5eme réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 10/11/2009.
14. Compte-rendu de la 6eme réunion du Groupe de Suivi de l'étude AREVA/DDASS/IRSN sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin. 02/02/2010.
15. MOCOCHAIN Ludovic, CLAUZON Georges, BIGOT Jean-Yves, and BRUNET Philippe, Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene : evidence from the Ardèche and Rhône valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, 2006. 188-189: p. 219-233.
16. Rapport BRGM 73 SGN 023 LAB, 1973, "Etude de la nappe alluviale du Rhône entre Donzère (Drôme) et Mondragon (Vaucluse)"
17. HUNEAU F. (2000). "Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen - Etude géochimique et isotopique du bassin Miocène de Valréas (Sud-Est de la France)." Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, p. 192.
18. Rapport ANTEA A42485/A, juillet 2006, "Synthèse bibliographique des données géologiques et hydrogéologiques du complexe du Tricastin à Pierrelatte (26)"
19. Rapport ANTEA A57072/A, janvier 2010, "Détermination par modélisation hydrodynamique des transferts possibles dans la nappe alluviale au sud du site du Tricastin"
20. Rapport HYDROC mars 2005, "Nouvelle ressource en eau potable - Quartier "les Bonnes Filles" - Etudes hydrogéologiques - Rapport de synthèse"
21. Compte-rendu de la réunion sur l'hydrogéologie de la nappe alluviale de la plaine du Tricastin. 15/05/2009.
22. Fiche IRSN, "Fiche radionucléide - Uranium naturel et environnement" (14/05/2001)
23. Fascicule de Documentation AFNOR FD X 31-615, Décembre 2000, "Qualité du sol - Méthodologie de détection et de caractérisation des pollutions - Prélèvement et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage"

24. Courrier DDAF26 MSI-DDAF26/2009_17, 28/05/2009, "Convention de mise à disposition d'informations sous forme numérique"
25. Compte Rendu DDASS 15/05/2009, "Etude sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin - Organisation de la campagne de prélèvements au Nord, à l'Est et à l'Ouest du site"
26. Fiche IRSN, "Fiche radionucléide - Tritium et environnement" (29/06/2001)
27. "Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R.1321-2, R.1321-3, R.1321-7 et R.1321-38 du code de la santé publique", Journal Officiel de la République Française, 6 février 2007.
28. AIEA, "Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments", Technical Reports Series. Vol. 364, 1994, Vienna. 75 pp.
29. AIEA, "Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments", Technical Reports Series. Vol. 472, 2010, Vienna. 208 pp.
30. Rapport IRSN /DEI/STEME n°2008-08, 14/11/2008, "Analyse de l'uranium dans les eaux destinées à la consommation humaine - Bilan des résultats obtenus pour les eaux d'adduction et pour les eaux minérales et thermales depuis 2004"
31. Rapport ASN janvier 2009, "La qualité radiologique de l'eau mise en distribution en France 2005-2007"
32. Rapport Technique IRSN /DEI/SARG/2008-037, 24/10/2008, "Evaluation de la situation radiologique de la commune d'Aigaliers (Gard)"
33. MAUREAU Alain, "Les mines de charbon de Piolenc du XIII au XXe siècle - Une ancienne industrie extractive dans le Vaucluse", 1972, Avignon.
34. MAUREAU Alain et GROSSO René, "Sauvegarde et Promotion du Patrimoine Industriel en Vaucluse", Cahier n° 46/2007, 2007.
35. Rapport ANTEA A57338/A, mars 2010, "AREVA NC - Site du Tricastin - Implantation de sondages de recherche de formations uranifères - Commune de Bollène (Vaucluse)"
36. Rapport Technique IRSN /DRPH/SER/2009-11, 22/06/2009, "Radioactivité naturelle renforcée : Synthèse des études reçues dans le cadre de l'application de l'arrêté du 25 mai 2005 relatif aux activités professionnelles mettant en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives"
37. Rapport ANTEA A55653/A, septembre 2009, "Site TRIADE à Bollène (Vaucluse) - Diagnostic environnemental du sous-sol"
38. LOCCI Jean-Pierre, "Mémoires d'industries vauclusiennes (XIXe - XXe siècles)", Association pour la Sauvegarde et la Promotion du Patrimoine Industriel en Vaucluse.
39. LOCCI Jean-Pierre, "L'exploitation des ressources minérales en Vaucluse aux XIXe et XXe siècles", Association pour la Sauvegarde et la Promotion du Patrimoine Industriel en Vaucluse.
40. Rapport IRSN pour le HCTISN, 15/09/2008, "Etat de la surveillance environnementale et bilan du marquage des nappes phréatiques et des cours d'eau autour des sites nucléaire et des entreposages anciens de déchets radioactifs"
41. Rapport du Haut-Commissaire à l'Energie Atomique HC/DDSN/98-183, 23/10/1998, "Groupe de travail sur la contamination radioactive et chimique des sites INBS - Rapport sur la contamination radioactive et chimique des sites comportant des installations nucléaires de base classées secrètes (INBS), relevant du ministre chargé de l'industrie"
42. Rapport KREBS FG/REHA/607.86/98.006, mai 1998, "COGEMA Etablissement de Pierrelatte - Butte de stockage : reconnaissance et étude d'impact"

ANNEXE 01

Composition du Groupe de Suivi

M. J.L. Lasalle	InVS - CIRE Sud
M. P. Royannez	Département de Vaucluse
Mme N. Panarin	Direction Générale/ Département de la Drôme
Mme C. Jeannenot	Conseil Général de la Drôme
M. A. Reme	LDA26
M. J.P. Castillo	LDA26
M. A.J. Girard	DSND
M. R. Escoffier	ASN Lyon
M. F. Chalamet	ASN Lyon
M. C.A. Louët	ASN Lyon
Mme C. Callens	DDASS Vaucluse
Mme S. Garcia	DDASS Vaucluse
Mme B. Vitry	DDASS Drôme
Mme J. Servien-Ray	DDASS Drôme
M. J. Petit	Areva NC
M. P. Florens	Areva NC
M. P. Vanuxem	EDF
M. R. Desbordes	CRIIRAD (observateur)
Mme. C. Castanier	CRIIRAD (observateur)
M. G. Le Dinahet	CFDT
M. J.P. Morichaud	FRAPNA
Mme G. Baumont	IRSN
M. J.C. Gariel	IRSN
M. M. Kerdelhué	IRSN
M. V. Rebour	IRSN
M. S. Bernard	IRSN
M. L. Pourcelot	IRSN
M. L. Saey	IRSN
M. F. Rollinger	IRSN
M. J.P. Carreton	IRSN

Des invités ont également pu intervenir au sein de ce Groupe de Suivi :

T. Monier	Hydrogéologue-expert de la Drôme (invité)
M. Ph. Crochet	ANTEA (invité)
M. D. Delmont	DSND

ANNEXE 02

Plan d'action de l'étude sur l'origine du marquage par l'uranium de la nappe alluviale de la plaine du Tricastin (2008 - 2010)

1 INTRODUCTION

L'IRSN, les DDASS de Vaucluse et de la Drôme et AREVA ont entrepris en 2007 une étude sur la radioactivité des eaux de forage autour du site de Tricastin-Pierrelatte. La première phase de cette étude a consisté à effectuer une campagne de prélèvements dans des puits privés situés au sud du site nucléaire du Tricastin et à analyser les isotopes de l'uranium ainsi que le plutonium et l'américium. Les conclusions de cette étude, qui mettait en évidence l'existence de quelques points où les concentrations en uranium dans l'eau de forages sollicitant la nappe dépassaient le bruit de fond (valeurs comprises entre 4 et 10,5 µg/L), ont été présentées lors de la CIGEET du 4 juillet 2008. Les concentrations en uranium dans les échantillons d'eau de forages utilisés pour la consommation humaine restaient inférieures à la valeur seuil recommandée par l'OMS dans les eaux de boisson (15 µg/L).

A la suite du déversement accidentel dans l'environnement d'une solution contenant de l'uranium, survenu dans la nuit du 7 au 8 juillet 2008 à l'usine SOCATRI (site nucléaire du Tricastin), un plan de surveillance spécifique a été mis en place afin d'évaluer la possibilité de migration d'uranium depuis les eaux de surface vers la nappe. Si l'analyse des nombreuses données de concentration en uranium obtenues dans le cadre de ce plan de surveillance n'a pas mis en évidence de relation entre l'augmentation transitoire de la teneur en uranium dans la Gaffière et le Lauzon consécutive au rejet accidentel et la concentration en uranium dans la nappe (à l'exception d'un point situé à quelques mètres de la rivière), ces investigations ont confirmé l'existence d'une variabilité spatiale de la teneur en uranium dans la nappe, et ont révélé des valeurs supérieures aux concentrations mesurées précédemment, et notamment supérieures à la valeur guide de l'OMS pour l'eau potable (15 µg/L), dans l'eau de forages utilisés pour la consommation humaine. Par ailleurs, la mise en place du plan de surveillance a conduit à l'obtention de séries temporelles de valeurs de concentrations en uranium dont l'analyse, en certains points, a révélé l'existence d'une variabilité temporelle.

Afin de progresser dans la compréhension de l'origine de la variabilité spatiale et temporelle de ce marquage, l'IRSN, AREVA et les DDASS ont pris l'initiative d'enclencher une deuxième phase de l'étude initiée en 2007. Il s'agira, durant cette étude, de rassembler et d'analyser des données environnementales multiples afin de pouvoir avancer des hypothèses d'une part quant à la variabilité observée de la teneur en uranium dans la nappe et d'autre part quant à l'origine possible de ce marquage. Une meilleure compréhension du phénomène permettra d'avoir la gestion la plus adaptée possible à la situation.

L'objectif du présent document est de présenter les différentes actions techniques et scientifiques ainsi que les moyens humains et analytiques qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs.

2 PLAN D'ACTION

L'étude sur l'origine du marquage de la nappe du Tricastin comprend trois volets : le premier s'attachera à caractériser spatialement et temporellement le marquage de la nappe principalement à travers l'analyse des mesures déjà effectuées dans les eaux de nappe et à la mise en place d'une campagne de mesures complémentaires. Le deuxième visera à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la nappe. Enfin, le dernier sera consacré à tester des hypothèses quant à l'origine possible du marquage de la nappe.

2.1. ACTION 1 : Caractérisation du marquage de la nappe du tricastin

2.1.1. ACTION 1.1 : Consolidation des données de surveillance acquise sur le site et au sud du site

Cette action vise à rassembler les données (valeurs de concentrations en uranium dans la nappe) disponibles d'une part sur le site et d'autre part au sud du site. Il s'agit des données issues soit de la surveillance réglementaire soit du plan de surveillance élaboré consécutivement au rejet accidentel (Figure). L'objectif est de constituer une base de données pleinement renseignée. L'effort portera en priorité sur :

- la localisation précise des points de prélèvements ;
- la caractérisation précise des forages et des puits (nature, profondeur et diamètre, âge et usage, etc..) ;
- la caractérisation des prélèvements qui pourrait éclairer sur l'origine de la variabilité temporelle des concentrations en uranium (profondeur de prélèvement, renouvellement de l'eau du puits, lithologie du terrain encaissant, conditions de répétitivité des prélèvements, filtration effectuée, résultats sur les MES,...).



Figure A1 : Carte localisant les puits de particuliers ayant fait l'objet de prélèvements d'eau en 2008 (points verts)

2.1.2. ACTION 1.2 : Campagne de mesure sur site

En complément de l'analyse des données fournies par les exploitants du site du Tricastin sur les teneurs en différents éléments chimiques et radioactifs, l'IRSN procédera à quelques prélèvements dans des piézomètres du site et effectuera des analyses portant sur l'uranium pondéral et les éléments suivants : Fluorure, B, Cr, CrVI, Ni, Fe tot. Fe II, Fe III, Mn, TCE, HCT. Des mesures in situ de niveaux, pH, température, conductivité et potentiel Redox seront réalisées pendant les prélèvements.

2.1.3. ACTION 1.3 : Campagne de mesures complémentaires au sud du site

L'objectif de cette action est d'aboutir à une vision aussi exhaustive que possible des concentrations en Uranium dans les points de prélèvement en nappe situés au sud du site (secteur délimité par le site, le canal de Donzère-Mondragon et le Rhône). Il s'agit de compléter la cartographie qui s'appuie à ce jour sur la surveillance effectuée à partir d'environ 180 points de prélèvement, par une campagne sur 120 points supplémentaires, situés plus loin du site. Les analyses porteront sur l'uranium pondéral.

Parmi l'ensemble des points de prélèvements situés au sud du site et ayant fait l'objet d'analyses en Uranium pondéral, 30 seront sélectionnés et feront l'objet de mesures complémentaires pour les éléments suivants (Ca, HCO_3^{21} , SO_4 , F, B, Fe tot, Fe II, Fe III, Cr et Ni). Ces éléments étant soit nécessaires pour caractériser les conditions géochimiques, soit des traceurs des activités du site nucléaire.

Par ailleurs, quelques points (une dizaine environ) situés autour du CNPE d'EDF feront l'objet d'analyses en tritium par l'IRSN.

De plus, AREVA procédera à une analyse de l'eau prélevée dans 27 forages de particuliers afin de déterminer si d'autres éléments chimiques (notamment les PCB, HCT et les composés organo-chlorés) sont présents dans la nappe.

2.1.4. ACTION 1.4 : Campagne de mesures complémentaires à l'ouest, au nord et à l'est du site

L'objectif de cette action est de connaître l'extension spatiale des anomalies et de préciser le bruit de fond géochimique, en particulier en ce qui concerne les teneurs en uranium. Les résultats de cette campagne pourraient permettre de fournir des éléments d'appréciation importants quant à la détermination de l'origine du marquage. Il est donc envisagé de procéder au prélèvement et à l'analyse d'échantillons d'eau de nappe dans 30 sites (forages/puits) au nord du site de Tricastin et dans 30 autres sites à l'ouest de ce même site. Cette caractérisation sera complétée par le prélèvement d'échantillons sur 10 points localisés en rive gauche du canal de Donzère-Mondragon (Est du site). Le nombre relativement élevé de points de prélèvements est justifié par l'hétérogénéité spatiale constatée au sud du site et par la nécessité de les mettre en regard des conditions géologiques qui varient dans cette zone. Les analyses porteront sur l'uranium pondéral ainsi que sur la caractérisation géochimique des eaux souterraines (Ca, HCO_3 , SO_4 , F, B, Fe tot, Fe II, Fe III, Cr et Ni). En conditions oxydantes (teneurs en oxygène dissous importantes), l'Uranium se complexe avec certains ligands dont l'affinité est variable selon les conditions du milieu. Les principaux ligands de l'Uranium sont les carbonates et les sulfates. Ces fortes affinités justifient de mesurer de manière concomitantes les concentrations en Uranium, en Calcium, en Carbonates et en Sulfates. Afin de s'assurer des conditions physico-chimiques du milieu de prélèvement, des mesures in situ de température, pH, Eh et conductivité seront réalisées lorsque l'équipement des lieux de prélèvement le

²¹ Cette notation est conventionnelle, elle regroupe l'ensembles des carbonates sous les formes CO_3 , HCO_3 , H_2CO_3

permettra. L'ensemble des prélèvements et des mesures in situ font l'objet d'un protocole spécifique décrit en Annexe A. Les descriptions du point de prélèvement et des conditions d'échantillonnage pourraient être compilées dans une fiche spécifique telle que celle disponible en Annexe B.

2.1.5. ACTION 1.5 : étude des rapports isotopiques de l'uranium présent dans la nappe

La détermination de la composition isotopique de l'uranium présent dans la nappe de Tricastin est un élément important à prendre en compte en ce qui concerne l'identification de l'origine du marquage. Cette action vise d'une part à collecter les données actuellement disponibles (issues soit de prélèvements passés soit du plan de surveillance mis en place en juillet 2008) et d'autre part, si cela s'avère nécessaire, à effectuer des analyses complémentaires sur des prélèvements effectués durant l'étude à venir.

2.1.6. ACTION 1.6 : étude de la variabilité temporelle du marquage

Le plan de surveillance mis en place suite au rejet accidentel de l'usine SOCATRI a mis en évidence une relative stabilité dans le temps des concentrations en uranium mesurées en un point. Cependant, en quelques points, une variation parfois importante de la teneur en uranium a été observée (Figure). De plus, le niveau de la nappe et les conditions d'alimentation (pluviométrie et recharge par les cours d'eau) fluctuent au cours du temps. Afin de caractériser et d'expliquer l'origine des fluctuations de la teneur en uranium, cette action consistera à suivre une dizaine de points de manière régulière (mensuellement) sur une longue période (1 an, en profitant si possible de mesures déjà effectuées).

Les points de prélèvement seront choisis sur la base de critères tels que : accessibilité permettant un prélèvement d'eau représentative de la nappe, teneurs en Uranium fortes, points présentant des teneurs en Uranium autour de 10 µg/L, point présentant une teneur en uranium faible (réalisation d'un « blanc »), niveau de connaissance des ouvrages et de l'encaissant.

Les analyses réalisées sur ces points de prélèvement concerneront les éléments suivants : Uranium pondéral, F, B, Fe tot, Fe II, Fe III, Ca, HCO₃, SO₄, Cr et Ni.

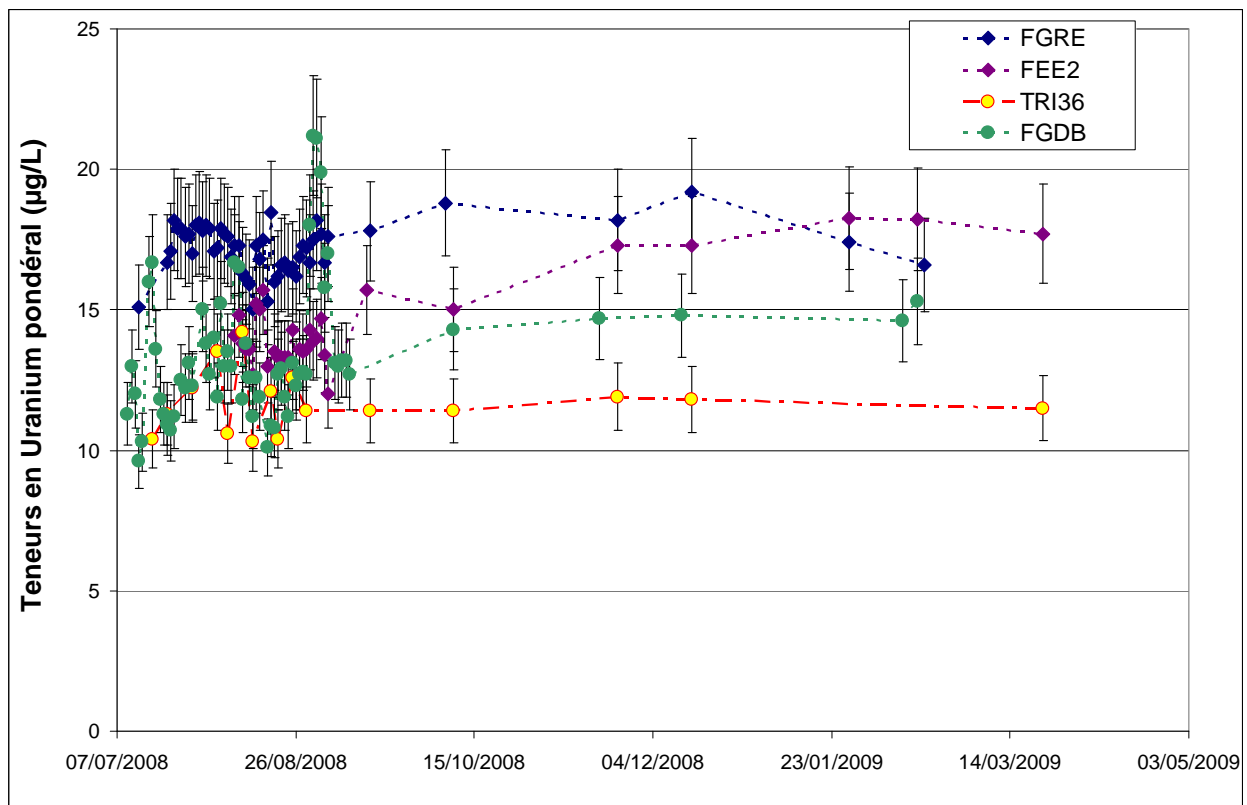


Figure A2 : Variations temporelles de la concentration en uranium observées dans les eaux prélevées chez quelques particuliers

2.2 ACTION 2 : caractérisation de la nappe du tricastin

2.2.1. ACTION 2.1 : étude hydrogéologique du secteur de tricastin

Cette action vise à une meilleure caractérisation de la nappe du Tricastin. Dans cet objectif, il sera procédé à une cartographie des écoulements (direction, vitesse, étude de la variabilité temporelle de ces paramètres). Cette cartographie doit permettre de préciser les contextes hydrogéologiques locaux ainsi que les échanges entre la nappe phréatique et la Gaffière (Figure). Ces différents éléments seront mis en relation avec les secteurs où sont observées les teneurs singulières en uranium dans l'eau de la nappe. Cette action s'appuiera sur une étude piézométrique sur l'ensemble du secteur d'étude (exploitation des résultats des piézomètres pour évaluer la vitesse de progression de l'uranium dans la nappe) ainsi que sur de la modélisation hydrogéologique. Il conviendra en particulier de tenir compte des enceintes géotechniques implantées sur le site du Tricastin et des gravières.

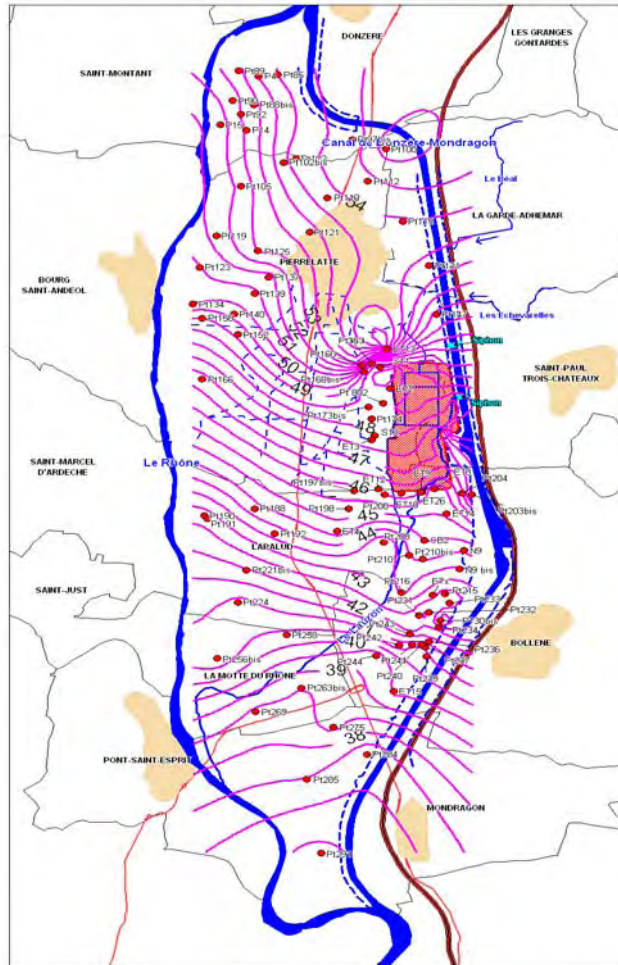


Figure A3 : carte piézométrique de la plaine du Tricastin

2.3. ACTION 3 : étude de l'origine possible du marquage de la nappe de tricastin

2.3.1. ACTION 3.1 : hypothèse d'une origine liée aux installations nucléaires du tricastin

Afin de tester l'hypothèse d'une origine du marquage de la nappe du Tricastin en rapport avec les activités nucléaires passées ou actuelles sur le site de Tricastin, cette action s'attachera :

- à effectuer une synthèse des données (teneurs en U, F, B, Cr, Ni...) disponibles sur le site de Tricastin au travers notamment des diagnostics sur les eaux souterraines et les sols effectués sur l'ensemble du site d'AREVA, en 1998 et en 2008-2009. Cela pourra, le cas échéant, conduire à effectuer des mesures complémentaires (bassins d'orage, sédiments...);
- à exploiter le bilan des rejets accidentels sur le site ;

-
- enfin, à examiner, du point de vue hydrogéologique, les transferts possibles sur et à l'extérieur du site nucléaire.

2.3.2. ACTION 3.2 : hypothèse d'une origine liée à des activités industrielles autres que celles du site nucléaire du Tricastin

Cette action vise à explorer la possibilité d'une origine industrielle du marquage en uranium de la nappe autre que celle liée au site nucléaire du Tricastin (SFEC, briquèterie, tuilerie, etc...). Cette action sera menée en particulier en exploitant la base BASIAS du MEEDDAT, ainsi que par la réalisation de diagnostics sur et autour de certaines anciennes installations industrielles. Un contact avec la DRIRE sera pris à cette occasion.

2.3.3. ACTION 3.3 : hypothèse d'une origine liée au contexte géologique

Certaines formations géologiques particulières peuvent conduire à des teneurs notables en uranium dans les eaux souterraines. Ainsi, régionalement des niveaux de lignites uranifères ont été étudiés et ont fait l'objet de demandes d'octroi d'une concession de mine d'uranium. Les coupes lithographiques avec diagraphies (consultables sur le site InfoTerre du BRGM) de forages réalisés en 1969 dans les secteurs couverts par l'étude indiquent la présence d'argile à lignite et dans une moindre mesure de grès du Crétacé présentant une activité gamma significative sur plusieurs mètres d'épaisseur. Afin de tester cette hypothèse d'un relargage d'uranium naturellement présent depuis le dépôt de ces couches, l'action 3.3 comprendra les volets suivants :

- Volet 1 : Compréhension de l'organisation stratigraphique du secteur, localisation des affleurements du Pliocène et du Crétacé et identification des niveaux organiques ;
- Volet 2 : Identification sur le terrain des faciès marneux et si possible des horizons lagunaires et des couches de lignites et mesures associées (flux, analyses en uranium,...)
- Volet 3 : Eventuellement forages dans des formations Pliocène et Crétacé à l'aplomb des points présentant une anomalie en uranium. Le prélèvement d'échantillons permettra de mesurer les teneurs en uranium de ces formations géologiques et d'étudier les phénomènes de rétention et de relargage de l'uranium en fonction des conditions chimiques de l'eau en contact avec ces formations, notamment le potentiel red-ox, teneurs en sulfure, manganèse, fer et éventuellement en bactéries.

Annexe A

Protocole de prélèvement des échantillons d'eau souterraine

Traçabilité des opérations

- Date et heure de prélèvement
- Identité du préleveur : société et nom du préleveur
- Identification précise du lieu de prélèvement : adresse - lieu dit - croisement
- Identification précise du point de prélèvement : nom du forage - piézomètres - ...
- Nature du point de prélèvement : forage - puits - piézomètre - robinet - ...
- Nature des outils de purge et de prélèvement : pompe immergée électrique, pompe péristaltique, pompe de surface, soupape, ...
- Nombre de flacons prélevés
- Type de flacons utilisés : PE - verre - ...
- Conservation des échantillons : glacière - frigo - ...
- Stabilisation des échantillons : filtration (\varnothing du filtre) – acidification (type acide et volume) - ...
- Etiquetage précis du flacon : point prélèvement – date – n° échantillon – filtration – acidification
- Date de remise des échantillons au laboratoire

Mesures à réaliser in situ

- Niveau piézométrique initial : (m / repère)
- Nature du repère de mesure : haut tubage - margelle puits - ...
- Hauteur du repère / sol : (m / sol)
- Profondeur de l'ouvrage : (m / repère)
- Profondeur des crépines (si existantes) : (m / Repère)
- Diamètre interne de l'ouvrage : (mm)
- Volume de l'ouvrage : (litres)
- Volume initial à purger : correspond à 3 à 6 fois le volume du puits (litres)

Paramètres Physico-chimiques à suivre en continu lors de la purge de l'ouvrage

Tps de pompage (mn)	Niveau dynamique (m/repère)	Débit de pompage (m ³ /h)	Volume purgé (litres)	Aspect de l'eau	Odeur de l'eau	Conduct. (μ S/cm)	Temp (°C)	pH	Eh
0	2.94								
5	3.05	1.4	116	limpide	non	777	17.2	7.08	650
10	3.09	1.4	230	limpide	non	778	17.2	7.07	645
20									
Prélèvement									

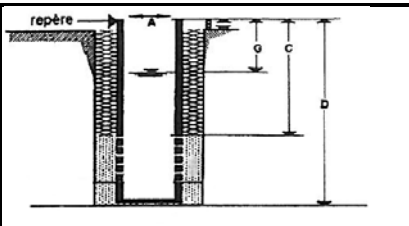
Les paramètres physico-chimiques doivent être stables lors du prélèvement.

Echantillonnage

Mise en place d'une procédure visant à minimiser l'aération des échantillons et les contacts avec l'air. Le circuit de prélèvement devrait s'effectuer du point le moins contaminé vers les points les plus contaminés pour éliminer les éventuels transferts par le matériel de purge et de prélèvement.

Les flacons devront être remplis au maximum pour éviter les contacts avec l'air.

Annexe B

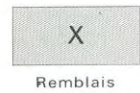
PRELEVEMENT EAU									
DESCRIPTION OUVRAGE									
Localisation (nom et adresse):									
	X (Lambert III): Y (Lambert III) : Z (NGF) : Nature de l'ouvrage : Usage de l'ouvrage (alimentation, irrigation jardin, ...): - consommation eau de nappe : OUI - NON - Jardin : OUI - NON								
	Designation :								
Opérateur(s) :	Prélevé le :								
Niveau piézométrique (G) : (m/rep)	Profondeur de l'ouvrage (D) : (m/rep)								
Nature du repère :	Profondeur des crépines (C): (m/rep)								
Hauteur du repère / sol : (m/rep)	Diamètre int. de l'ouvrage (A) : mm								
Cote du repère : (m NGF)	Volume de l'ouvrage : litres								
Outil de prélèvement :	Volume minimal à purger : litres								
Position de l'aspiration : (m/rep)	Volume renouvelé réalisé : %								
Outil de purge :	Refoulement eaux :								
Paramètres physico-chimiques mesurés in situ									
Temps de pompage (mn)	Niveau dynamique (m / repère)	Débit de pompage en m ³ /h	Volume purgé (en litres)	Aspect de l'eau	Odeur de l'eau	Conduct. µS/cm.	Temp °C	pH	Eh
Observations :									
Echantillons délivrés au laboratoire :							Date :		
Flaconnage :									
Conditionnement des échantillons :									
Stabilisation, filtration échantillons :									
<i>Observations ou justification du non respect du mode opératoire :</i>									

ANNEXE 03

Carte géologique du secteur d'étude Légende



FORMATIONS SUPERFICIELLES



Formations résiduelles ou faiblement remaniées, indifférenciées



E1 - Eboulis vifs
E2 - Eboulis consolidés

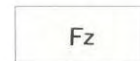


Masses rocheuses glissées

Alluvions holocènes



Dépôts torrentiels récents

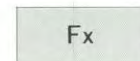


Alluvions modernes (Post-Würmien)

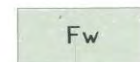
Alluvions anciennes



Würm



Riss

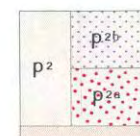


Mindel

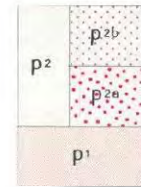


Villafranchien

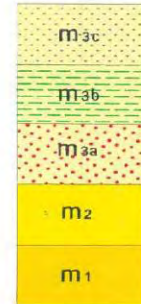
FORMATIONS TERTIAIRES



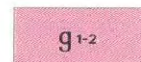
FORMATIONS TERTIAIRES



Pliocène
p2b Cailloutis à galets calcaires
p2a Argiles et sables
p2 Sables jaunes micacés (Astien)
p1 Marnes argileuses bleues (Plaisancien)



Miocène
m3c Tortonien supérieur conglomératique
Sables à galets, conglomérats
m3b Tortonien moyen lacustre
Sables gris, cailloutis
m3a Tortonien inférieur marin
Sables argileux, marnes sableuses
m2 Helvétien
Sables et grès jaunes
m1 Burdigalien
Mollasse quartzo-calcaire et mollasse calcaire

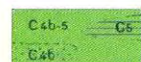


Oligocène
Complexe de Suzette à cargneules et à gypse



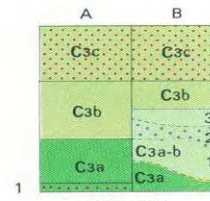
Eocène
Marnes blanches sans fossiles

FORMATIONS SECONDAIRES

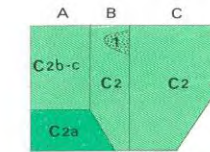


Coniacien et Santonien
C4b-5 Sables, argiles, marnes à lignites
C5 Calcaire argileux à Rudistes
C4b Calcaires quartzeux à Rudistes et Polypiers
A : Cèze B : Uchaux
C4a Calcaires quartzeux C4a Calcaires quartzeux de Mornas
1 - Grès de base

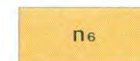
FORMATIONS SECONDAIRES (suite)



Turonien
A : Cèze B : Uchaux - Région d'Orange
C3c Grès et sables "ucétiens"
C3c Grès et sables de Montmout
C3b Calcaires gréseux jaunes à Polypiers
C3b Grès de Boncavaïl
3 - Marnes à S. pilula
C3a-b 2 - Calcaires gréseux et grès
1 - Calcaires blancs à niveaux marneux
C3a Calcaires gréseux et grès
1 - Niveau de base



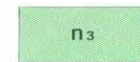
Cénomanien
A-B : Uchaux - Orange et Cèze C : Massif de Suzette
C2 Grès à lignites
1 - Lentille ligniteuse
C2b-c Grès et grès-calcaires
C2a Grès blancs
C2 Marnes, sables argileux, calcaires gréseux et glauconieux



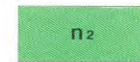
Gargasien
Marnes bleues



Bédoulien-Barrémien
n5 n4b-5 Calcaires de Vaison
n4 n4a Calcaires et marnes



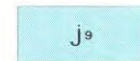
Hauterivien
Marnes grises et calcaires argileux



Valanginien
Marnes grises



Berriasien
Calcaires sublithographiques



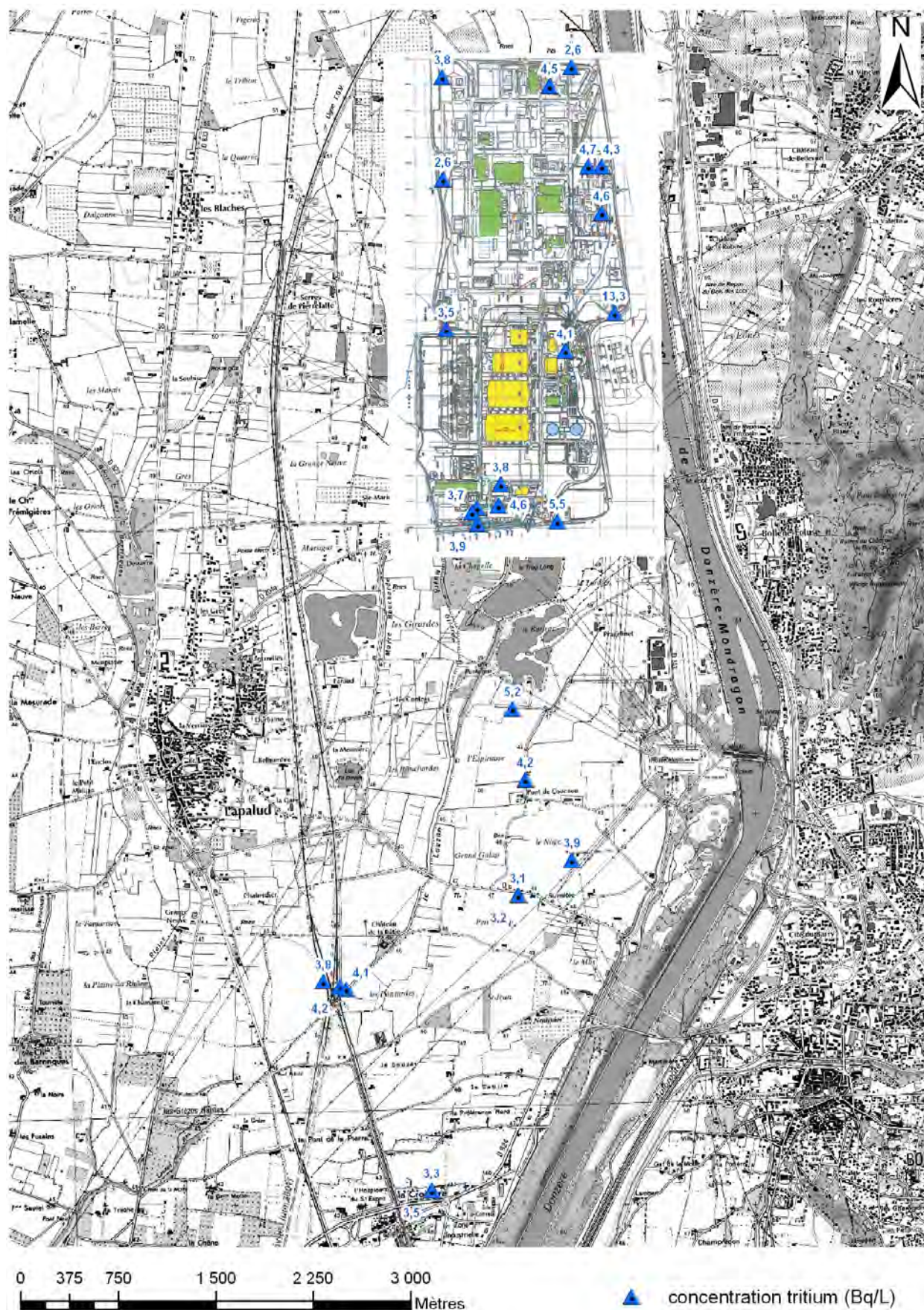
Portlandien - Kimméridgien supérieur
Calcaires massifs (Tithonique)

ANNEXE 04

Résultats des analyses en tritium de l'eau de nappe sur le site nucléaire et dans l'environnement

Nom du point de prélèvement	³ H (Bq/L)	incertitude
TRI35	3,2	0,7
TRI36	3,1	0,7
FEE2	3,9	0,7
FGTO	4,2	0,7
AEP4bis	5,2	0,7
FGMY	3,5	0,7
FGBMF	3,3	0,8
ET310	4,2	0,8
ET309	4,1	0,7
ET311	3,8	0,7

ET027	4,6	0,7
ET038	3,9	0,7
ET41	3,7	0,7
ET19	3,9	0,7
ET32	3,8	0,7
ET08	5,5	0,8
ET269	4,1	0,7
ET201	4,3	0,7
N1bis	2,6	0,7
ET01	2,6	0,6
PZAN3	4,5	0,7
N5	3,8	0,7
ET11	13,3	1
ET226	3,5	0,7
ET203	4,7	0,8
ET212	4,6	0,8



ANNEXE 05

Solution analytique du transport de soluté

L'utilisation d'une solution analytique simple (expressions directes et exactes) appliquée au transport des solutés permet de simuler la concentration d'un élément donné à une distance connue et en fonction du temps écoulé depuis l'injection (équation (1)).

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-(x-vt)^2}{4Dt}\right) \quad (1)$$

Avec :

C_0 [ML⁻³] : Concentration initiale en soluté à $t = 0$

D [L²T⁻¹] : Dispersion du soluté

t [T] : temps depuis l'injection

x [L] : distance au point d'injection

v [LT⁻¹] : vitesse de l'eau

Si les molécules de soluté s'adsorbent sur les solides selon une cinétique d'adsorption instantanée et réversible d'ordre un, alors les termes de vitesse (v) et de dispersion (D) doivent être corrigés par un terme de retard (R) adimensionnel (équation (2)). Le terme retard vient ainsi diminuer la vitesse et la dispersion du soluté par rapport à celles de l'eau. C'est donc un coefficient de proportionnalité entre le déplacement de l'eau et le déplacement du soluté.

$$R = 1 + \frac{K_d \rho}{n} \quad (2)$$

Avec :

K_d [L³M⁻¹] : coefficient de partition sol/eau

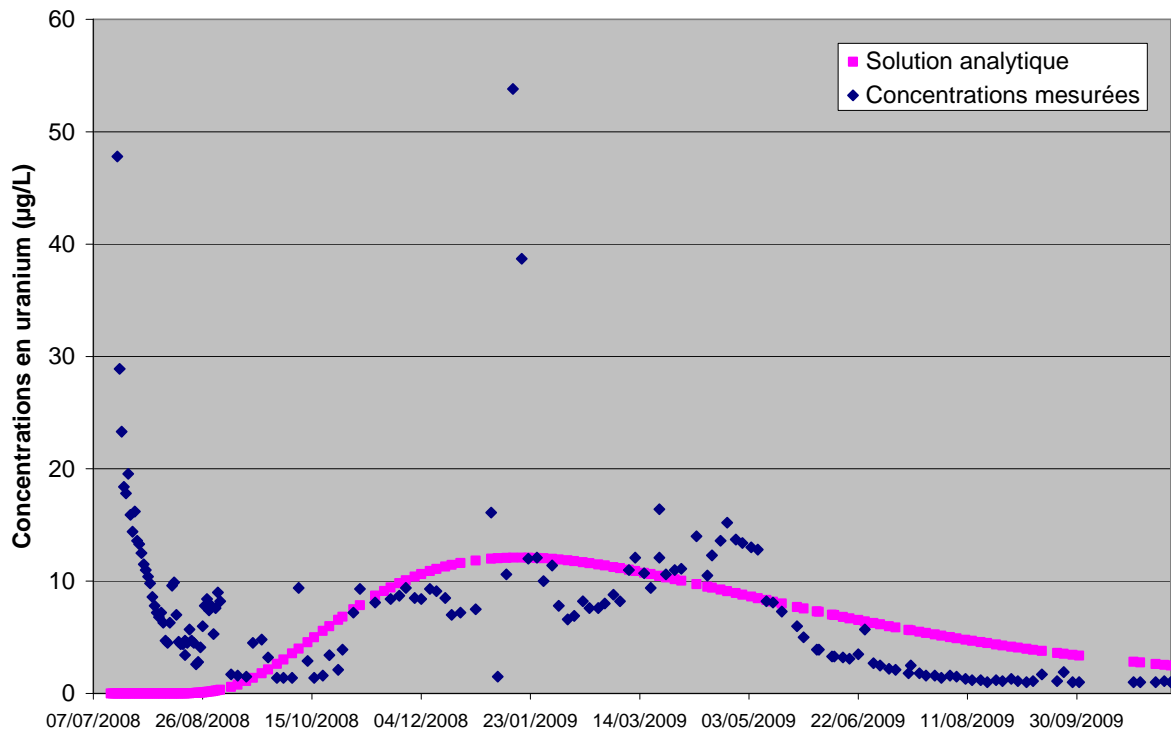
ρ [ML⁻³] : masse volumique apparente sèche du matériau aquifère

n [-] : porosité

La combinaison des équations (1) et (2) définit l'équation analytique du transport par convection-dispersion d'un soluté réactif injecté instantanément et ponctuellement (équation (3)).

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi \frac{D}{R} t}} \exp\left(\frac{-\left(x - \frac{v}{R} t\right)^2}{4 \frac{D}{R} t}\right) \quad (3)$$

Le calage de la solution analytique sur la chronique de concentrations mesurées sur le piézomètre ET309 (figure suivante) permet de déterminer numériquement une valeur de coefficient de retard, *i.e.* la capacité de sorption/désorption de l'uranium sur les particules solides du matériau aquifère.



Simulation des concentrations en uranium dans le piézomètre ET309 par une solution analytique

ANNEXE 06

Logs géologiques et techniques des ouvrages réalisés par la SNPA et par AREVA

Sondage Petit Galap

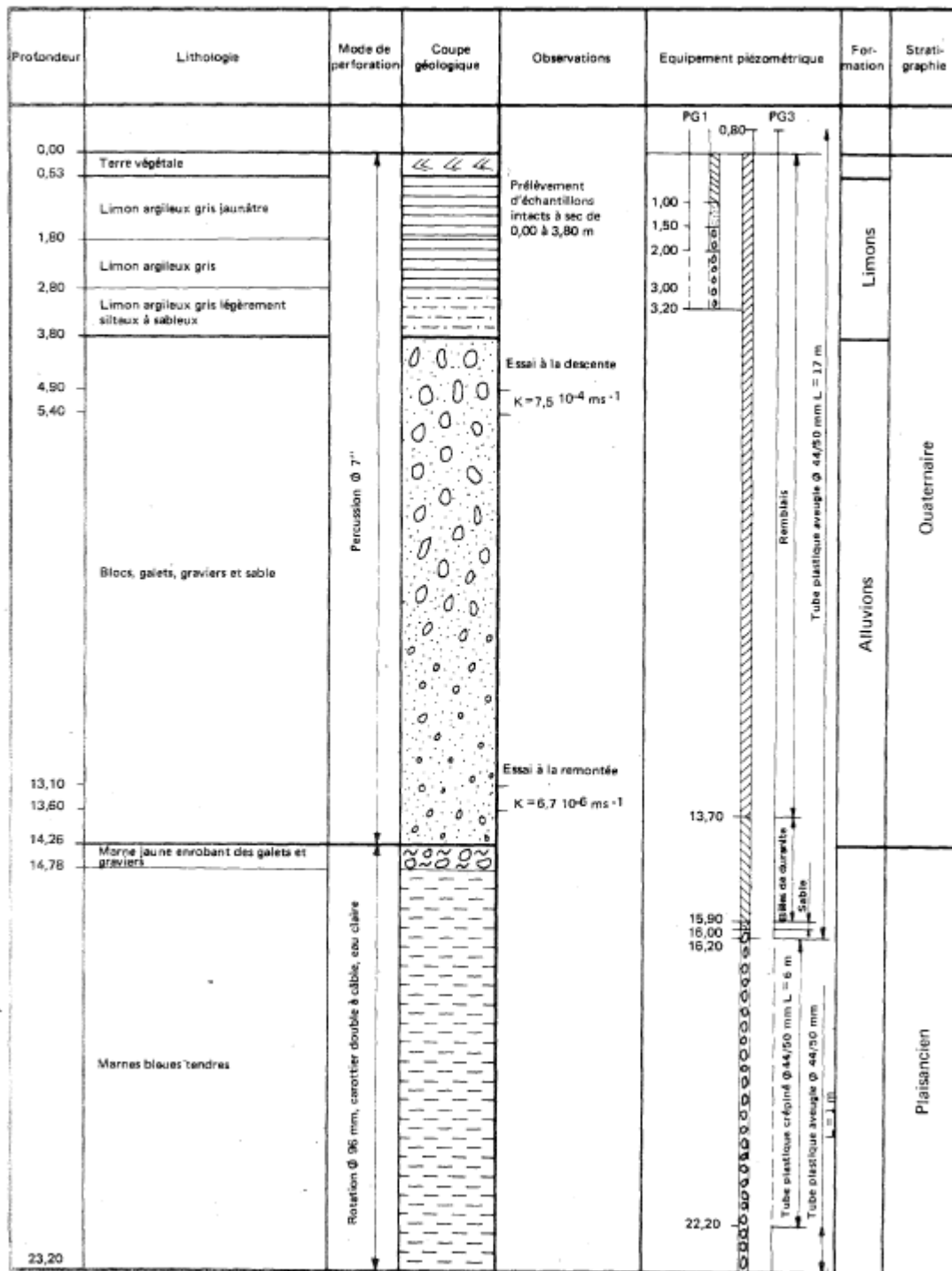
Sondage petit Galap

Solétanche Avril 1969

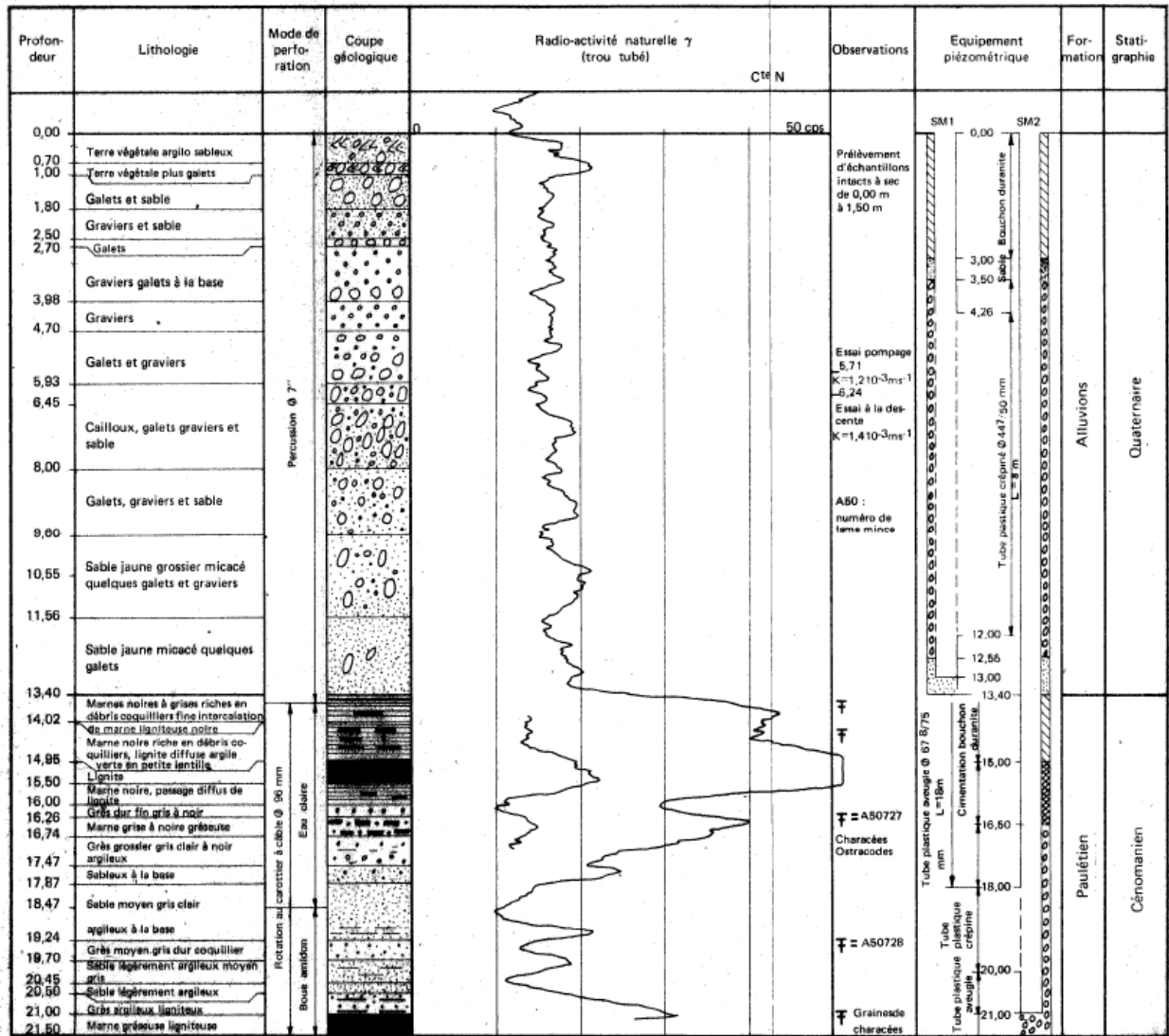
PG1 - PG3

Profondeur 23,20 m

Figure 10



Sondage Mirabelle

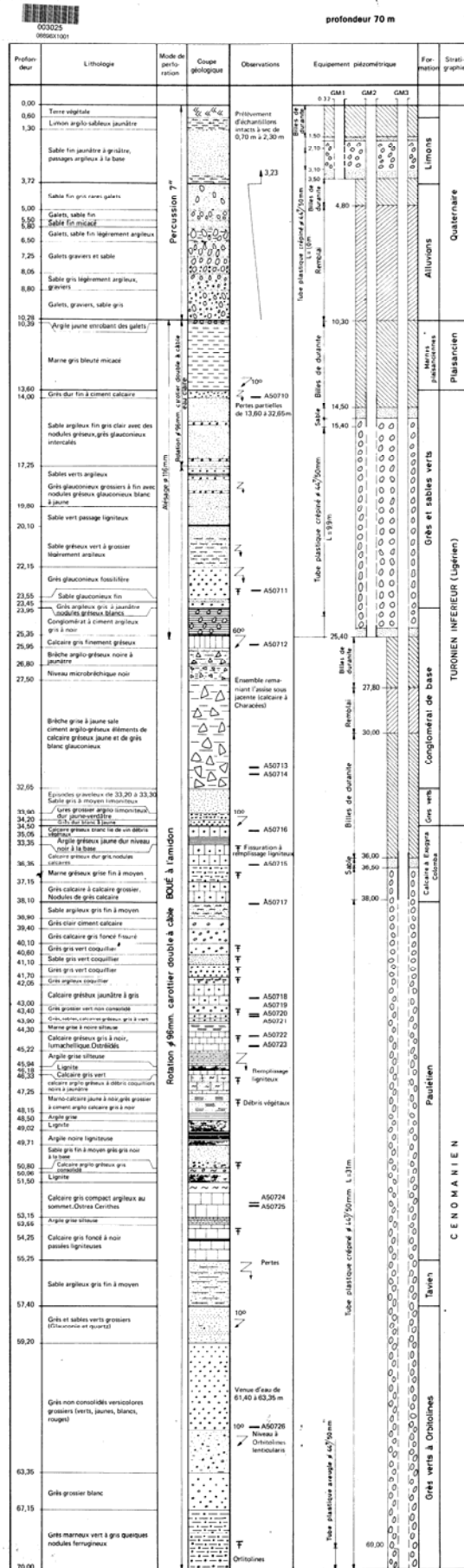


Sondage Grand Malijac

CONFIDENTIEL

Sondage Grand Malijac
Piézomètres GM1, GM2 et GM3

Solénache Mai 1969



Sondage Préférence

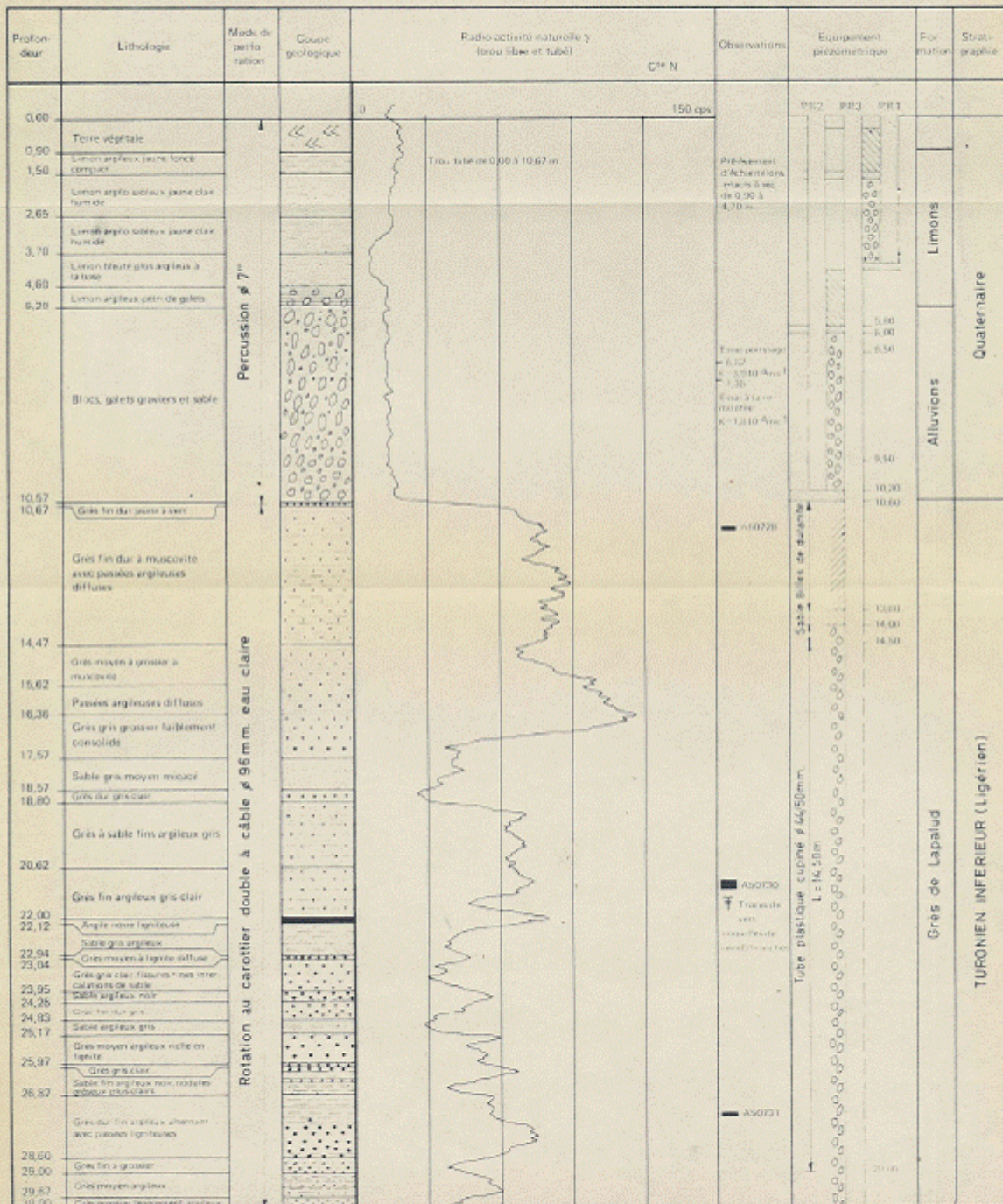
Solétanche Mai 1969

Sondage Préférence


Piézomètres PR1, PR2 et PR3

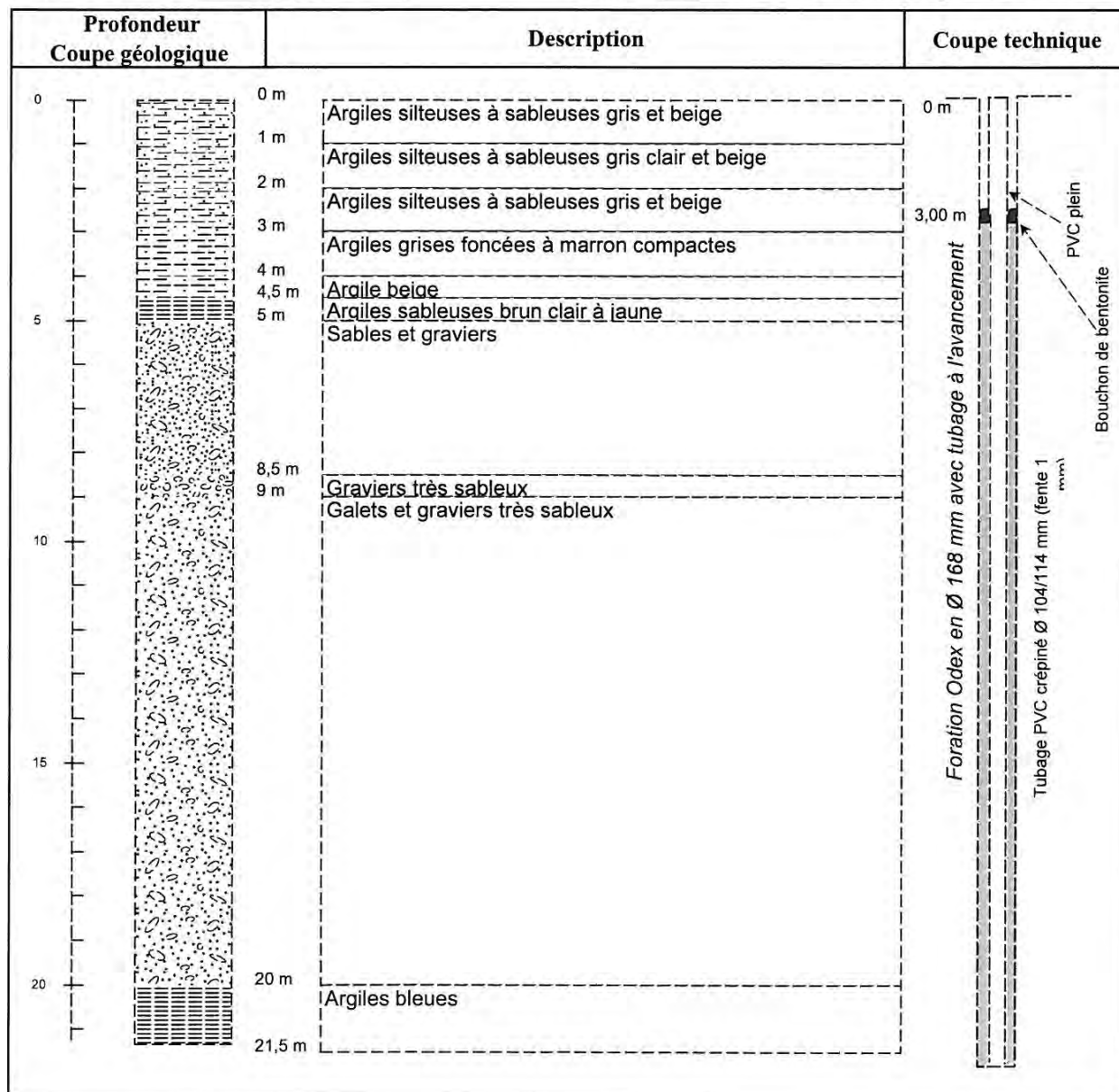
profondeur 30 m

Figure A14



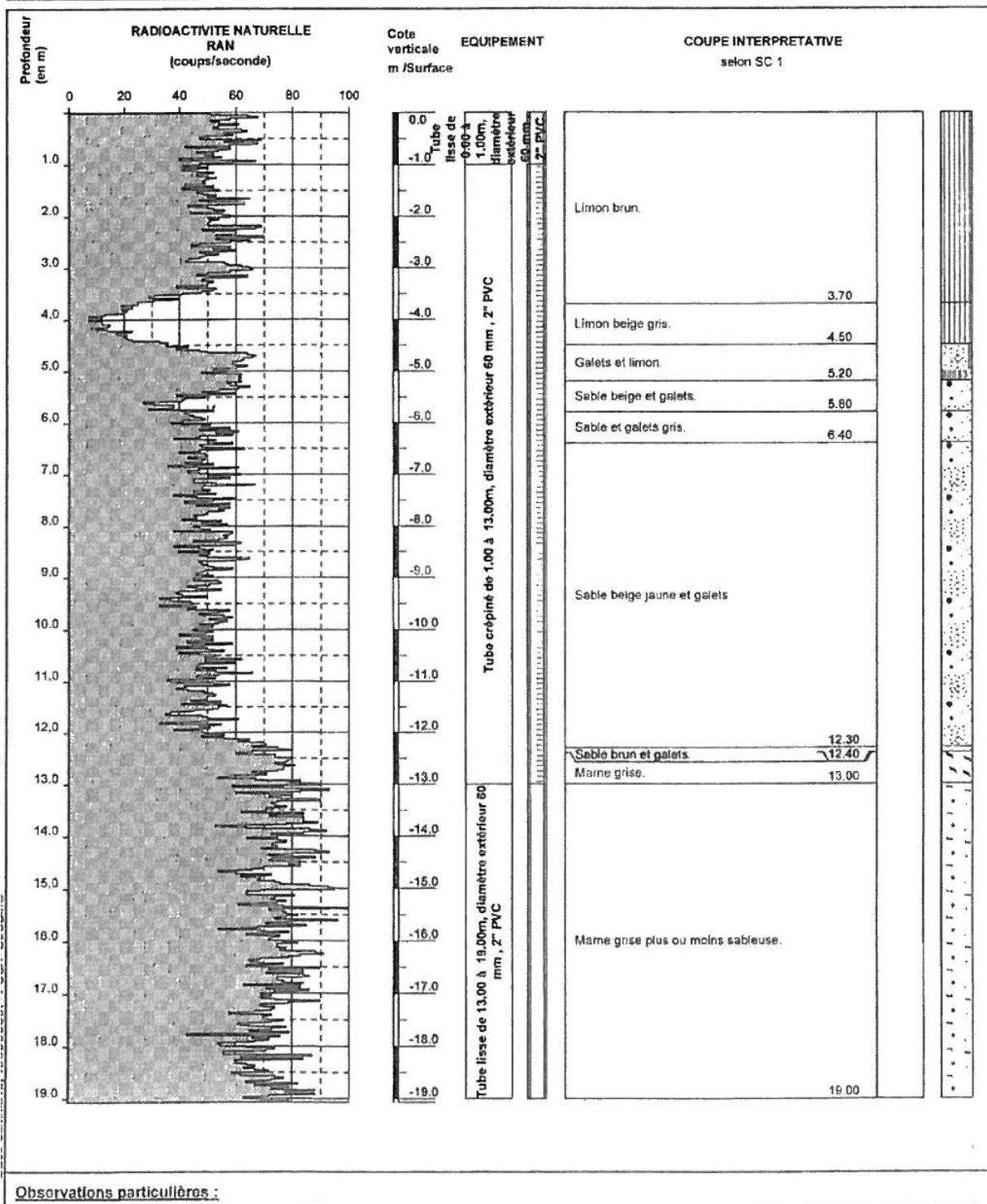
Piézomètre ET271

	CREATION D'UN PIEZOMETRE		Piézomètre
			Pz station
ANTEA RAAB Le parc du Lyonnais 392, rue des Mercières 69140 RILLIEUX LA PAPE Tél : 04.37.85.19.60 Fax : 04.37.85.19.61	Projet n° GREP070109 Intitulé : AREVA - Site du Tricastin Synthèse environnementale Responsable du projet : S. LESOIN Début de campagne : 25/03/2008 Fin de campagne : 16/05/2008		
Suivi opérateur <input type="text" value="L. LOREAU"/>	Entreprise <input type="text" value="ABYSSE"/>		
Date <input type="text" value="14/05/2008"/>	Machine <input type="text" value="Sondeuse"/>		
	Outils <input type="text" value="Odex en Ø 168 mm avec tubage à l'avancement"/>		



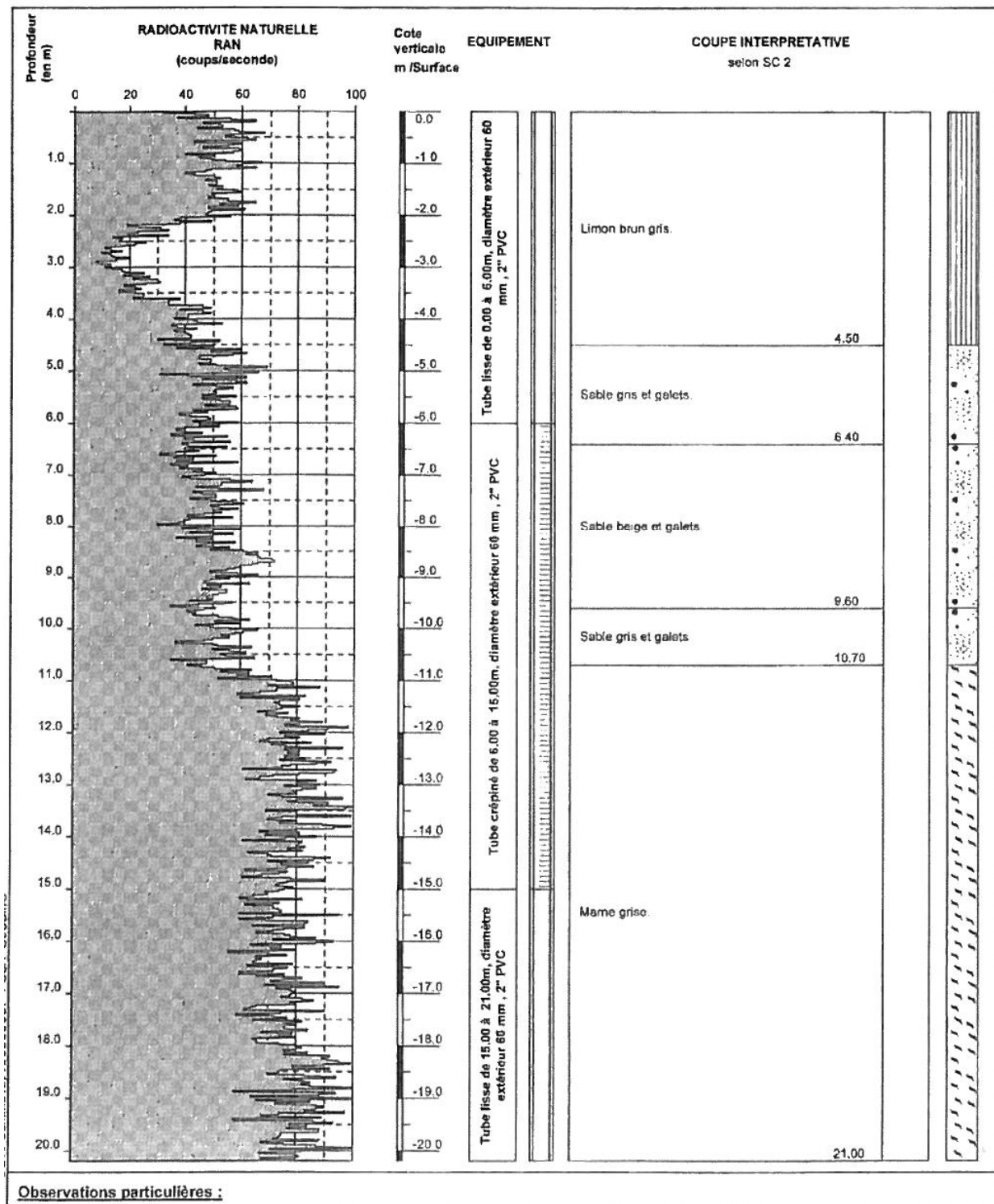
Sondage SC1

<p>SC Plaine de Tricastin BOLLENE (84)</p> <p>Ref. dossier : 09L-035a00- DMO</p>	<p>DIAGRAPHIE DE SONDAGE PAR GAMMA RAY</p> <p>Echelle 1:100e</p>	<p>GAR - SC1</p> <p>Opérateur équipement : AHC - FRASTE XL 100 C Sondage réalisé du 11/11/2009 au 12/11/2009</p> <p>Référence , surface du sol Opérateur géophysique HAL Profondeur de fin : 19.0 m</p> <p>Page : 1/1</p>
--	--	--



Sondage SC2

<p>SC Plaine de Tricastin BOLLENE (84)</p> <p>Réf. dossier : 09L-035a00- DMO</p>	<p>DIAGRAPHIE DE SONDAGE PAR GAMMA RAY</p> <p>Echelle 1:100e</p> <p>Page : 1/2</p>	<p>GAR - SC2</p> <p>Opérateur équipement : AHC - FRASTE XL 100 C Sondage réalisé du 10/11/2009 au 11/11/2009</p> <p>Référence : surface du sol Opérateur géophysique : HAL Profondeur de fin : 18,0 m</p>
--	--	--



ANNEXE 07

Photos des affleurements de roches prélevés pour analyses des teneurs en uranium



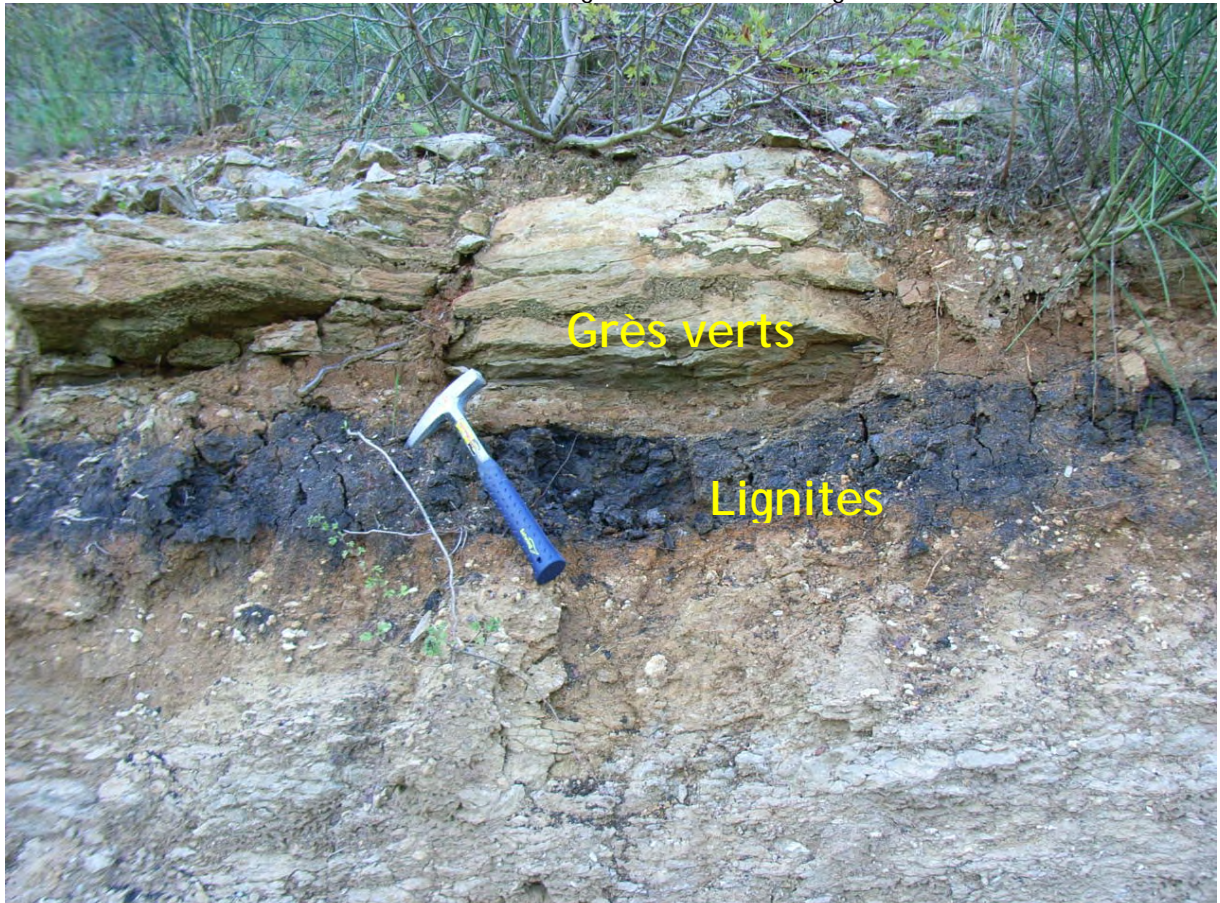
Affleurement de Saint-Just - Marnes bleues du Pliocène



Affleurement de Saint-André-D'Olérargues - puissance métrique



Affleurement de Saint-André-D'Olérargues - zoom sur les lignites du Cénomaniens



Affleurement de Mondragon - Grès verts et Lignite du Turonien inférieur

Des mesures de débit de dose ont été réalisées au moyen d'une sonde gamma et X très bas flux de type 6150 AD-b (SAPHYMO n° de série 118219) couplée à un radiamètre 6150 AD5 (marque SAPHYMO n° de série 116218) et sont reportées dans le tableau suivant :

Nom échantillon	Type de roche	Age	Débit de dose (nSv/h)
SJ_01	Marnes bleues	Pliocène	80 - 100
SAO_01	Lignites	Cénomanién	850
SAO_02			1000
MOND_01	Lignites	Turonien	100 - 150
MOND_02	Grès verts	Turonien	100 - 150

ANNEXE 08

**Fiche descriptive du site INB
et INBS du Tricastin (hors
CNPE) issue du rapport IRSN
de 2008 pour le HCTISN**

Site nucléaire du Tricastin (hors CNPE)

Description du site / Nature des activités exercées

Le site nucléaire du Tricastin est situé dans la vallée du Rhône, dans la plaine de Pierrelatte, entre Montélimar au nord et Orange au sud. Ce site est dédié, d'une part à la production d'électricité (CNPE du Tricastin), d'autre part à la chimie de l'uranium, à l'enrichissement en isotope 235 de l'uranium et aux services associés. Outre le CNPE, décrit dans une fiche séparée, ce site est composé principalement :

- du Centre d'études de la vallée du Rhône (CEA/VALRHO) dont la vocation est la recherche dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium,
- d'une installation nucléaire de base secrète (INBS), dont l'exploitant est AREVA-NC,
- de COMURHEX qui assure la conversion de l'uranium extrait des mines sous une forme chimique adaptée (UF_6) permettant son enrichissement,
- d'AREVA NC qui assure notamment la défluoruration de l' UF_6 appauvri en provenance d'EURODIF,
- d'EURODIF : l'usine Georges BESSE qui réalise l'enrichissement de l'uranium naturel en vue de l'élaboration du combustible des CNPE,
- des installations AREVA NC autrefois exploitées par la Société Franco-Belge de Fabrication des combustibles (FBFC) qui fabriquait les équipements nécessaires à la construction des assemblages de combustibles pour les CNPE et qui sont en cours de démantèlement,
- de SOCATRI dont la principale activité est la maintenance de matériels issus d'installations nucléaires et le traitement de surface,
- de la Base Chaude Opérationnelle du Tricastin (BCOT) qui est destiné à des opérations de maintenance et d'entreposage de matériels et d'outillages provenant des réacteurs nucléaires à eau sous pression, à l'exclusion d'éléments combustibles. Les effluents radioactifs liquides de la BCOT (INB n°157), exploitée par EDF, sont pris en charge par le CNPE du Tricastin. Préalablement à chaque transfert d'effluents, l'exploitant vérifie leurs caractéristiques radiologiques. Après traitement, ces effluents en provenance de la BCOT sont rejetés avec les autres effluents du CNPE du Tricastin par le circuit de contrôle et de stockage des effluents liquides avant rejet.

L'INBS de Pierrelatte (AREVA-NC) occupe une superficie d'environ 300 hectares au nord du site du Tricastin. Cet établissement a pour vocation la chimie de l'uranium et comprend 74 installations individuelles à caractère technique d'installation classée pour protection de l'environnement (ICT-ICPE) dont la plupart ne sont pas suivies par l'IRSN. L'INBS abrite également les installations individuelles suivantes :

- les usines de diffusion gazeuse (UDG) en cours de démantèlement ;
- l'usine de recyclage et d'élaboration (URE) qui a pour mission la transformation chimique d'uranium très enrichi et le recyclage de matières uranifères ;
- le Parc P 07 lié aux activités de l'URE ;
- le laboratoire principal qui a pour mission de réaliser les contrôles analytiques pour l'ensemble des unités ;
- les ateliers de maintenance qui ont pour mission de réaliser la maintenance de différents matériels dont les conteneurs transportant de l'uranium ;
- des parcs d'entreposage et de manutention de conteneurs d'uranium constituant 3 installations individuelles ;
- l'atelier de transfert-échantillonnage (TE) qui assure notamment l'échantillonnage et le transvasement de l' UF_6 d'un emballage à un autre ;

-
- les ateliers de transformation de l'uranium TU3, à l'arrêt, et TU2 qui a pour mission la valorisation du nitrate d'uranyle ;
 - deux installations de traitement de déchets : la station de traitement des déchets (STD) et la station de traitement des effluents chimiques (STEC) ;
 - le bâtiment diffuseurs qui est dédié au démantèlement des UDG.

Outre l'INBS, le site regroupe également les installations suivantes.

A l'est du site, l'établissement de la société COMURHEX comprend :

- l'INB n°105 constituée d'un atelier de transformation du nitrate d'uranyle en hexafluorure d'uranium UF₆ (qui a effectué sa dernière campagne en 2007), d'un atelier de conversion de l'UF₆ en oxydes d'uranium (à l'arrêt depuis une dizaine d'années) et de parcs d'entreposage ;
- des ICPE traitent la quasi-totalité des matières uranifères et des produits chimiques mis en œuvre sur l'établissement ; ces ICPE ne sont pas suivies par l'IRSN.

Dans la partie sud de l'établissement AREVA NC, l'INB n°155, exploitée par AREVA-NC : elle est constituée de l'installation TU5 (transformation du nitrate d'uranyle en U₃O₈) et de l'ICPE W (défluoration de l'hexafluorure d'uranium).

Au sud du site, l'INB n°93, exploitée par la société EURODIF Production, est constituée d'une usine d'enrichissement isotopique de l'uranium par diffusion gazeuse d'UF₆, d'un atelier d'alimentation et de soutirage de l'UF₆ assurant l'interface avec l'usine d'enrichissement, d'un atelier de réception, d'expédition et de contrôle de l'UF₆ et de parcs d'entreposage de l'UF₆. EURODIF exploite également un parc d'entreposage de trifluorure de chlore, ICPE soumise à autorisation.

Au sud de l'INB n°93, l'INB n°138, exploitée par la société SOCATRI, assure la maintenance, la rénovation, l'assainissement, le démantèlement de matériels, le traitement d'effluents uranifères ou industriels issus de ces activités ou d'autres installations du site ainsi que le traitement et le conditionnement de déchets nucléaires, notamment, pour le compte de l'ANDRA, des déchets dits « petits producteurs » issus des hôpitaux et des laboratoires.

Egalement au sud de l'INB n°93, l'INB n°157 (BCOT) exploitée par EDF : ses activités actuelles sont principalement la maintenance d'outillages utilisés par EDF lors des arrêts de tranches des réacteurs à eau pressurisée.

Le site comporte également :

- l'usine FBFC de Pierrelatte, située au nord-ouest du site, qui fabrique des composants d'assemblages combustibles et des sources radioactives scellées ; elle n'est plus classée INB depuis le 22 mai 2003 ;
- l'INB n°168 - Georges Besse II, exploitée par la société SET et destinée à remplacer à terme l'INB 93 ; elle est constituée de deux unités d'enrichissement isotopique de l'uranium par centrifugation d'UF₆ gazeux (situées au sud et au nord de l'INB n°93), d'un atelier de réception, d'expédition et de contrôle de l'UF₆ et d'un laboratoire ; cette installation n'a pas encore reçu, à ce jour, d'autorisation d'exploitation.

Au sud-est du site et à l'extérieur de tout périmètre d'INB, se trouve l'installation TRIADE exploitée par la société STMI. Ses activités sont l'assainissement et l'entreposage de matériels et de déchets faiblement radioactifs, provenant principalement des réacteurs EDF. C'est une ICPE (qui n'est pas suivie par l'IRSN) dont l'arrêté préfectoral date de juin 1993 : il autorise les rejets, dans le contre-canal, d'effluents liquides contenant uniquement des substances chimiques, avec un contrôle continu de l'activité radiologique des effluents. Cette ICPE est installée dans les locaux occupés, de 1961 à la fin des années 80, par l'usine de la SFEC (Société de fabrication d'éléments catalytiques, groupe CEA) :

cette usine, ex-INBS, a assuré la fabrication des barrières en céramique pour les usines d'enrichissement par diffusion gazeuse (UDG et EURODIF), la fabrication par voie sèche d'éléments combustibles uranium ainsi que des essais avec du thorium.

Radionucléides présents dans les installations

Les principaux radionucléides susceptibles d'être présents dans les effluents liquides ou gazeux rejetés, du fait de leur manipulation dans les installations dans des conditions normales de fonctionnement, sont :

- l'uranium naturel, l'uranium provenant du traitement de combustibles usés (URT), l'uranium enrichi en isotope 235,
- des transuraniens (émetteurs alpha),
- des produits de fission (émetteurs $\beta\gamma$),
- le tritium,
- le ^{14}C ,
- des produits d'activation.

L'uranium se présente essentiellement sous forme d'hexafluorure (UF_6), de tétrafluorure (UF_4), d'oxyfluorure (UO_2F_2) de nitrate d'uranyle et d'oxyde (UO_2 et U_3O_8).

Les installations mettent en œuvre des quantités significatives de produits chimiques (fluor, chlore, ammoniac, acide sulfurique, bifluorure acide de potassium, nickel, chrome, bore...) qui se retrouvent dans les effluents liquides et gazeux rejetés (sous forme de fluorures, de chlorures, de nitrates...) et qui sont susceptibles d'être à l'origine de pollutions des sols ou de la nappe en cas de fuite.

Autorisations de rejets d'effluents radioactifs

Les autorisations de rejets sont données par les documents suivants :

- INBS : arrêté du 16 avril 2008 ;
- INB n°155 : décision de l'ASN n° 2007-DC-0075 du 4 décembre 2007, homologuée par arrêté du 5 février 2008 ;
- INB n°105 : arrêté du 17 août 2005 et décision ASN n°2007-DC-0079 du 4 décembre 2007, homologuée par arrêté du 5 février 2008 ;
- ICPE COMURHEX : arrêté préfectoral n°04-3443 du 22 juillet 2004 ;
- INB n°138 : décision ASN n°2007-DC-0077 du 4 décembre 2007 relatives aux rejets des effluents gazeux, homologuée par arrêté du 5 février 2008 ; arrêté du 16 août 2005 relatif aux rejets des effluents liquides ;
- INB n°93 : arrêté du 16 août 2005 pour les effluents liquides, autorisation limitée pour les isotopes de l'uranium 15 GBq/an, après traitement par SOCATRI, l'activité transférée à SOCATRI étant limitée à 145 GBq/an ;
- INB n°157 : ne dispose d'aucune autorisation de rejet. Les effluents liquides produits dans l'installation sont transférés par citerne au CNPE du Tricastin ;
- INB n°87 et 88 : arrêté du 8 juillet 2008 pour les effluents gazeux et liquides.

Tous les rejets liquides s'effectuent dans le canal de Donzère-Mondragon.

Entreposages anciens de déchets

Dans l'INBS, les entreposages anciens de déchets radioactifs sont localisés :

-
- dans la « butte de stockage » située au nord de l'installation COMURHEX. Dans cette butte, ont été placés 760 tonnes de barrières de diffusion gazeuse contenant quelques tonnes d'uranium, des déchets constitués de filtres de conditionnement (46 m^3) renfermant des traces d'uranium (moins de 1 kg), de la fluorine ($14\,000 \text{ m}^3$) et 55 m^3 de boues (contenant du chrome trivalent),
 - dans des silos situés dans la partie nord du site ; 263 m^3 de gravats provenant du pilote d'enrichissement de l'uranium par le procédé chimique CHEMEX y sont entreposés.

La STD de l'INBS abrite également des entreposages de déchets solides et liquides dont certains sont anciens, tels que des huiles et des solvants contaminés par de l'uranium enrichi (entreposage de 150 m^3), ainsi que des cendres provenant du brûlage des huiles et des solvants (cette activité est arrêtée depuis avril 1993).

Par ailleurs, plus d'une dizaine de parcs d'entreposage et de manutention, couverts ou à ciel ouvert, contenant de l'uranium sous toutes ses formes physico-chimiques sont répartis sur le site, notamment dans la zone de COMURHEX où sont entreposés sur une aire bétonnée couverte non-étanche des fûts renfermant des résidus fluorés uranifères, des boues de diuranate de potassium, de l' UF_4 , des résines échangeuses d'ions, des filtres de ventilation, des déchets technologiques et des matériels volumineux contaminés, contenant ou susceptibles de contenir de l'uranium enrichi à plus de 1% en isotope 235.

Evènements principaux liés à des rejets

INBS AREVA NC

Les sols sont contaminés par de l'uranium essentiellement en 3 points : à l'est (zone COMURHEX), au nord et au centre ouest (zone STD) du site. De plus, il existe des marquages en fluorure localisés et non totalement corrélés aux marquages par l'uranium. L'origine de ces contaminations fait actuellement l'objet d'investigations de la part d'AREVA.

Les principaux incidents de fuites et de déversements d'effluents radioactifs survenus dans l'INBS sont les suivants :

- 23 juin 1986 : fuite d' UF_6 à la suite d'une perte de confinement au niveau de la liaison conteneur d'émission - circuit de procédé de l'installation TU3 (les prélèvements atmosphériques ont montré une activité alpha de l'air variant de 27 Bq/m^3 à 133 Bq/m^3 dans un rayon de 100 m).
- 5 juillet 1989 : débordement dans l'atelier TU2 d'un conteneur SAFRAP-LR35 à la suite d'une mauvaise surveillance pendant le remplissage (25 m^2 de sol ont été contaminés par du nitrate d'uranyle).
- 4 décembre 1992 : lors du dépotage d'un conteneur LR 35 (SAFRAP), épandage dans l'atelier TU2 de 653 litres d'une solution de nitrate d'uranyle, contenant de l'uranium à 400 g/L enrichi à 1,1% : 435 litres se sont répandus dans la cuvette de rétention placée sous le conteneur SAFRAP et 218 litres (soit 88 kg d'U) se sont répandus sur l'aire goudronnée (30 à 35 m^2) et ont été traités par épandage de chaux sur l'aire goudronnée avec conditionnement des déchets correspondants.
- 22 novembre 1997 : rupture de confinement d'une cuve annulaire mobile entreposée dans l'atelier de traitement et de récupération (ATR) de l'URE. Epandage d'une solution de nitrate d'uranyle (9 g/L d'uranium enrichi) sur une surface d'environ 40 m^2 . Perte d'environ 230 litres de solution, soit environ 580 g d' U^{235} , vraisemblablement infiltrée (solution très corrosive) à travers les joints des dalles du local (la nappe phréatique est située aux environs de 2,80 mètres sous les dalles).
- 2 avril 2001 : défaillance du système de filtration de la ventilation de l'atelier TU2 ayant conduit à la dispersion d'au maximum 700 g d'uranium dans l'environnement.

-
- 4 mai 2003 : TU2 : dissémination de nitrate d'uranyle au stockage nord de l'atelier TU2 à la suite d'une fuite au niveau d'une pompe (contamination du revêtement en macadam du sol extérieur).

COMURHEX

Les incidents répertoriés concernent l'ICPE :

- 4 janvier 1975 : rejet de 87 kg d'UF₆ dans l'atmosphère suite à la défaillance du robinet pointeau d'un conteneur en fin de remplissage.
- 1^{er} juillet 1977 : rejet de 7 tonnes d'UF₆ liquide à l'extérieur suite à l'arrachage du robinet pointeau d'un conteneur contenant 8,8 tonnes d'UF₆ liquide en cours de refroidissement.
- de fin 1976 à début 1977 de fortes concentrations en uranium naturel ont été mesurées dans la nappe proche de la zone de la butte de l'INBS.

Par ailleurs, plusieurs incidents ont été liés à des fuites de tuyauteries enterrées de transfert d'effluents reliant différentes installations de l'établissement COMURHEX ou ce dernier à la STEC, notamment les 29 août 1995, 11 avril 1997 (13 m³ à 70 µg/L) et 10 septembre 2004 (8 m³ à 160 µg/L). Le dernier incident de ce type déclaré par COMURHEX date du 3 juin 2008.

D'autres incidents non portés à la connaissance de l'IRSN ont pu se produire sur l'établissement de COMURHEX.

EURODIF

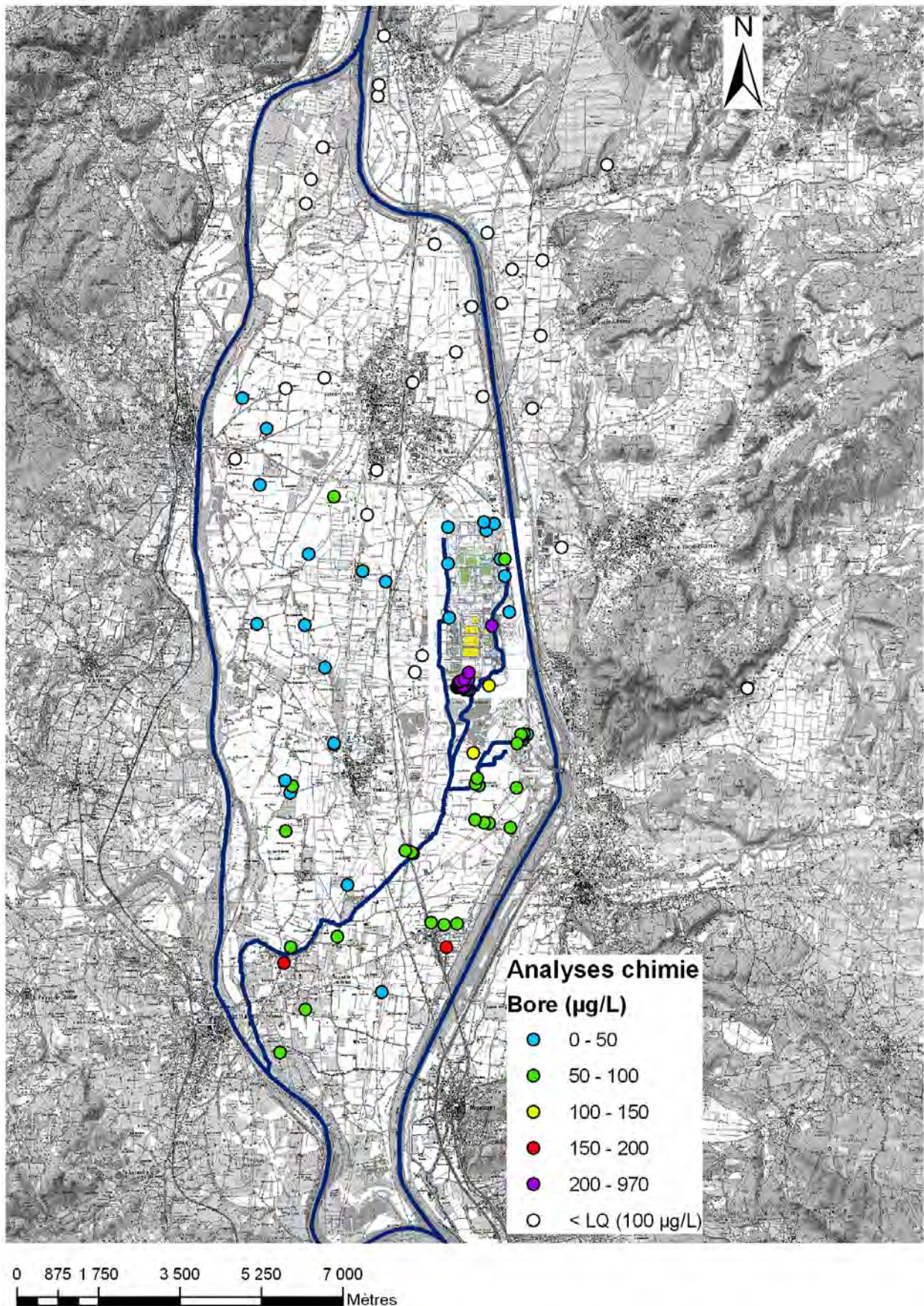
- 10 septembre 1989 : fuite de 400 kg d'UF₆ (270 kg d'U, dont 10 kg à l'extérieur d'un bâtiment annexe).
- Fuites récurrentes du réseau primaire (EC) de refroidissement des échangeurs UF₆, fonctionnant avec de l'eau borée (tétraborate de potassium). Ces fuites ont entraîné des disséminations de bore dans le sol et dans la nappe ou des rejets d'eau borée dans la Gaffière, soit par le réseau de collecte des fuites raccordé au réseau des eaux pluviales, soit par l'intermédiaire du circuit secondaire (à une pression inférieure à celle du primaire), qui rejette en continu dans la Gaffière (fonctionnement normal). Ainsi, sur la période septembre-octobre 2007, les rejets de bore dans l'environnement ont été de l'ordre de 2,8 tonnes.
- Fuites récurrentes des réseaux de fluides caloporteurs du procédé utilisant le perchloréthylène (PCE) et le trichloréthylène (TCE), à l'origine des marquages du sol et de la nappe en PCE et TCE.

SOCATRI

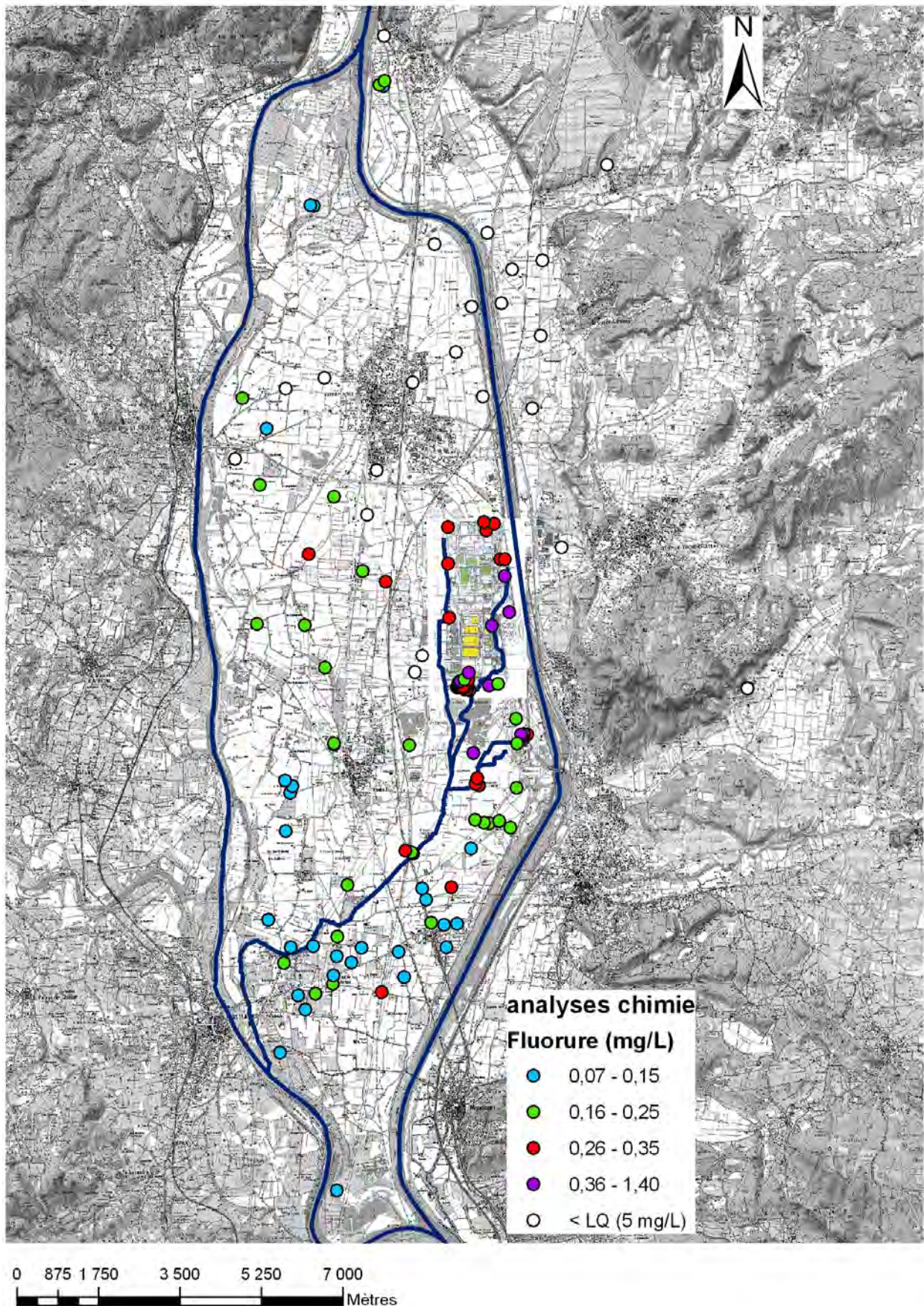
- Début des années 1990 : fuite d'une cuve, et de la cuvette de rétention associée, contenant une solution de traitement de surface à base de nickel et de chrome, ayant entraîné une forte pollution du sol et de la nappe (plusieurs mg/L de Cr dans la nappe). Des pompages à fort débit dans la nappe, à proximité de la fuite, ont permis de récupérer une partie de la matière (1 500 kg de Cr) ; la zone polluée est sous surveillance continue.
- 7 juillet 2008 : fuite d'une cuve contenant une solution uranifère et de la cuvette de rétention associée, ayant entraîné la dissémination dans le sol et dans les eaux de surface d'environ 70 kg d'uranium.
- Fuites récurrentes (détectées) du réseau de rejet des effluents après traitement dans le canal (réseau KR). Ce réseau, ancien, est enterré, ce qui ne permet pas la détection des petites fuites. Il est en cours de remplacement.

ANNEXE 09

Cartes de répartition du bore et du fluor



La présence d'éléments chimiques en fortes concentrations dans les eaux prélevées a contraint le laboratoire en charge des analyses à diluer ces échantillons. Cette dilution a pour conséquence d'augmenter la limite de quantification (LQ).



La présence d'éléments chimiques en fortes concentrations dans les eaux prélevées a contraint le laboratoire en charge des analyses à diluer ces échantillons. Cette dilution a pour conséquence d'augmenter la limite de quantification (LQ).

ANNEXE 10

Résultats des analyses chimiques et radiologiques réalisées pour l'eau de nappe du site nucléaire du Tricastin

Labo	LDA26	IRSN	AREVA	LDA26	IRSN	AREVA	IRSN	AREVA
élément	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁵ U	²³⁵ U	²³⁵ U	²³⁴ U	234U
point prélèvement	unité	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
N5	1,1	1,09	1	0,008	0,008	-	0,00007	-
N1BIS	1,1	1,07	1	0,007	0,008	-	0,00007	-
ET 226	1,5	1,47	1,4	0,011	0,011	-	0,00009	-
ET 32	2,1	2,1	2,1	0,017	0,017	-	0,00014	-
ET 38	2,83	2,77	2,7	0,023	0,022	-	0,00017	-
ET 41	2,43	2,37	2,3	0,02	0,019	-	0,00016	-
ET 19	2,1	2	2	0,017	0,016	-	0,00013	-
ET 27	11,52	11,3	11,3	0,083	0,081	0,082	0,00060	0,00068
ET 1	1,5	1,57	1,5	0,011	0,011	-	0,00010	-
PZAN3	38	38	36,6	0,26	0,275	0,261	0,00201	0,00183
ET 201	14	13,3	13,3	0,1	0,103	0,103	0,00073	0,00080
ET 203	3,6	3,54	3,4	0,027	0,028	-	0,00023	-
ET 212	26	25,4	25,6	0,194	0,193	0,193	0,00155	0,00154
ET 11	42	40,8	41,1	0,64	0,669	0,656	0,00649	0,00658
ET 269	2,13	2,13	2,1	0,017	0,017	-	0,00014	-
ET 8	1,7	1,64	1,6	0,013	0,012	-	0,00010	-
Gaffière amont		1,1			0,008		0,00006	
STMI		1,1			0,008		0,00007	

Labo	LDA26	LDA26	LDA26	AREVA	LDA26	AREVA	LDA26	AREVA
élément	Fe tot	Fe II	Cr	Cr	Cr VI	Cr VI	B	B
point prélèvement	unité	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
N5	1,5	<LQ	0,5	<10	<LQ	<20	31	26
N1BIS	1,2	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	34	29
ET 226	1,5	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	38	29
ET 32	<LQ	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	768	740
ET 38	<LQ	<LQ	70	72	70	70	281	260
ET 41	<LQ	<LQ	41	30	41	24	240	220
ET 19	26	<LQ	14	14	14	<20	127	110
ET 27	<LQ	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	860	900
ET 1	1,5	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	28	25
PZAN3	1,5	<LQ	0,5	<10	<LQ	<20	35	26
ET 201	118	80	<LQ	<10	<LQ	<20	60	44
ET 203	80	70	<LQ	<10	<LQ	<20	30	22
ET 212	0,7	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	29	18
ET 11	1036	390	<LQ	<10	<LQ	<20	34	28
ET 269	<LQ	<LQ	<LQ	<10	<LQ	<20	469	440
ET 8	359	240	<LQ	<10	<LQ	<20	141	126

Labo		LDA26	LDA26	AREVA	LDA26	AREVA
élément		Mn	Ni	Ni	F	F
point prélèvement	unité	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
N5		<LQ	0,3	<20	325	280
N1BIS		<LQ	0,5	<20	332	310
ET 226		<LQ	0,6	<20	338	280
ET 32		<LQ	<LQ	<20	443	420
ET 38		12	291	277	392	360
ET 41		<LQ	12	<20	404	380
ET 19		52	<LQ	<20	381	360
ET 27		17	<LQ	<20	461	420
ET 1		0,2	4,5	<20	326	270
PZAN3		<LQ	0,5	<20	322	300
ET 201		179	0,8	<20	312	290
ET 203		119	0,3	<20	325	290
ET 212		<LQ	0,7	<20	770	680
ET 11		355	1,8	<20	598	530
ET 269		33	<LQ	<20	394	350
ET 8		247	<LQ	<20	442	390

Labo		LDA26	AREVA	LDA26	AREVA	LDA26	AREVA
élément		TCE	TCE	PCE	PCE	HCT	HCT
point prélèvement	unité	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L
N5		<LQ	<3	0,3	<3	<LQ	<0.5
N1BIS		<LQ	<3	5,7	4	<LQ	<0.5
ET 226		<LQ	<3	0,8	<3	<LQ	<0.5
ET 32		0,9	<3	11	10	<LQ	<0.5
ET 38		0,5	<3	12	12	<LQ	<0.5
ET 41		0,9	<3	11	10	<LQ	<0.5
ET 19		1,7	<3	18	14	<LQ	<0.5
ET 27		1,3	<3	31	35	<LQ	<0.5
ET 1		<LQ	<3	<LQ	<3	<LQ	<0.5
PZAN3		<LQ	<3	0,3	<3	<LQ	<0.5
ET 201		2,8	<3	7,8	6	<LQ	<0.5
ET 203		2,7	<3	7	6	<LQ	<0.5
ET 212		0,5	<3	8,7	8	<LQ	<0.5
ET 11		<LQ	<3	<LQ	<3	<LQ	<0.5
ET 269		28	23	658	700	<LQ	<0.5
ET 8		<LQ	<3	0,2	<3	<LQ	<0.5

ANNEXE 11

Résultats des analyses isotopiques réalisées pour les eaux de nappe dans la plaine du Tricastin et pour le site nucléaire de Pierrelatte

points	Dates	AREVA			IRSN				LDA26				
		²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude	²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude	²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude
AEP12	12/10/2009												
	23/03/2009					4,33	0,45	0,728	0,021	7,2	0,72	0,75	0,075
AEP4	20/10/2009									3,9	0,39	0,74	0,074
	20/04/2009					3,82	0,41	0,721	0,026				
AEP4bis	18/05/2009					3,71	0,41	0,727	0,025				
	22/06/2009					3,24	0,34	0,724	0,025				
	20/04/2009					6,01	0,67	0,723	0,026				
AEP4ter	18/05/2009					6,12	0,67	0,724	0,024				
	22/06/2009					5,82	0,61	0,725	0,022				
Beroule S	19/10/2009									2	0,2	0,73	0,073
Blachère	19/10/2009									0,8	0,08	0,79	0,079
ET302	15/10/2009									2,2	0,22	0,75	0,075
ET309	23/03/2009					12,1	1,3	0,723	0,019				
	15/10/2009									2,8	0,28	0,77	0,077
ET310	23/03/2009					17,2	1,9	0,726	0,019				
	12/10/2009									17,5	1,75	0,75	0,075
ET311	23/03/2009					7,38	0,78	0,728	0,021				
	15/10/2009									4,8	0,48	0,74	0,074
FEE2	24/11/2008	17,3		0,716	0,036								
	23/03/2009					17,7	1,9	0,724	0,022				
	20/04/2009					17,6	1,9	0,726	0,019				
	18/05/2009					17,5	2	0,725	0,027				
	22/06/2009					17	1,8	0,725	0,02				
FGBMF	24/11/2008	13,8		717	0,036								
	23/03/2009					12,4	1,3	0,726	0,018				
	20/04/2009					12,3	1,4	0,723	0,023				
	18/05/2009					12	1,3	0,724	0,021				
	22/06/2009					12,1	1,3	0,729	0,019				
FGCR1	12/10/2009									12,8	1,28	0,72	0,072
FGDB	12/12/2008	14,8		0,713	0,036								
	27/10/2008	12,5		0,72	0,036								
FGFE	12/10/2009									18,3	1,83	0,74	0,074
	24/11/2008	17,6		0,717	0,036								
	20/04/2009					11,2	1,3	0,725	0,023				
FGGS	18/05/2009					12,2	1,3	0,719	0,021				
	22/06/2009					12,3	1,3	0,723	0,02				
	12/10/2009									15,8	1,58	0,75	0,075
FGMC3	12/10/2009									11	1,1	0,74	0,074
	24/11/2008	14,3		0,718	0,036								
	23/03/2009					13,1	1,4	0,726	0,021				
FGMY	20/04/2009					13,5	1,5	0,726	0,027				
	18/05/2009					13,1	1,4	0,727	0,021				
	22/06/2009					13,1	1,4	0,727	0,022				
	12/10/2009									15,5	1,55	0,75	0,075
FGQU1	30/10/2008	11		0,718	0,036								
FGRE	20/10/2009									16,3	1,63	0,75	0,075
FGRI	12/10/2009									5,1	0,51	0,74	0,074
FGSB	19/12/2008	11		0,724	0,036								
	23/03/2009					4,49	0,47	0,726	0,018				
	20/04/2009					3,52	0,37	0,73	0,024				
FGTO	18/05/2009					3,47	0,37	0,726	0,023				
	22/06/2009					12,7	1,4	0,728	0,022				
	12/10/2009									11	1,1	0,74	0,074
FGTR	27/10/2008	11,8		0,723	0,036								
Hugouvieux H	19/10/2009									7,6	0,76	0,75	0,075
LAP20	12/10/2009									10,4	1,04	0,74	0,074
LAP22	12/10/2009									2,5	0,25	0,75	0,075
Million G	19/10/2009									19,1	1,91	0,75	0,075
MON02	12/10/2009									4,2	0,42	0,75	0,075
N9bis	15/10/2009									14,8	1,48	0,75	0,075
Pt224	12/10/2009									2,2	0,22	0,76	0,076
Pt275	15/10/2009									1,2	0,12	0,79	0,079
Sorace	19/10/2009									1,4	0,14	0,77	0,077
	23/03/2009					9,5	1	0,727	0,02				
	20/04/2009					10,1	1,2	0,722	0,024				
TRI35	18/05/2009					10	1,1	0,729	0,025				
	22/06/2009					10,5	1,1	0,724	0,025				
	15/12/2008	11,8		0,714	0,036								
	23/03/2009					11,5	1,2	0,725	0,021				
TRI36	20/04/2009					11,5	1,3	0,722	0,025				
	18/05/2009					11,4	1,2	0,724	0,017				
	22/06/2009					11,2	1,2	0,726	0,024				

points	Dates	AREVA				IRSN				LDA26			
		²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude	²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude	²³⁸ U	Incertitude	²³⁵ U/ ²³⁸ U (%)	Incertitude
ET01	09/06/2009					1,57	0,16	0,701	0,024	1,5	0,15	0,733	0,0733
ET08	09/06/2009					1,64	0,17	0,732	0,02	1,7	0,17	0,765	0,0765
ET11	09/06/2009	41,1	4,11	1,596	0,08	40,8	4,4	1,64	0,047	42	4,2	1,524	0,1524
ET15	15/10/2009									5,7	0,57	0,77	0,077
ET19	09/06/2009					2	0,21	0,8	0,022	2,1	0,21	0,81	0,081
ET201	09/06/2009	13,3	1,33	0,774	0,039	13,3	1,4	0,774	0,024	14	1,4	0,714	0,0714
ET203	09/06/2009					3,54	0,38	0,791	0,023	3,6	0,36	0,75	0,075
ET212	09/06/2009	25,6	2,56	0,754	0,038	25,4	2,8	0,76	0,024	26	2,6	0,746	0,0746
ET226	09/06/2009					1,47	0,16	0,748	0,023	1,5	0,15	0,733	0,0733
ET269	09/06/2009					2,13	0,22	0,798	0,02	2,13	0,213	0,798	0,0798
ET27	09/06/2009	11,3	1,13	0,726	0,036	11,3	1,2	0,717	0,021	11,52	1,152	0,72	0,072
ET271	15/10/2009									10,9	1,09	0,72	0,072
ET32	09/06/2009					2,1	0,22	0,81	0,021	2,1	0,21	0,81	0,081
ET38	09/06/2009					2,77	0,29	0,794	0,022	2,83	0,283	0,813	0,0813
ET41	09/06/2009					2,37	0,24	0,802	0,021	2,43	0,243	0,823	0,0823
N1bis	09/06/2009					1,07	0,11	0,748	0,021	1,1	0,11	0,636	0,0636
N5	09/06/2009					1,09	0,12	0,734	0,02	1,1	0,11	0,727	0,0727
PZAN3	09/06/2009	36,6	3,66	0,713	0,036	38	4	0,724	0,021	38	3,8	0,684	0,0684

ANNEXE 12

Résultats des analyses isotopiques réalisées pour les eaux de nappe, les eaux de surface et les sédiments du site nucléaire de Pierrelatte et de son environnement depuis 1977

Mesures des teneurs en uranium pondéral et rapports isotopiques sur des prélèvements d'eau de nappe et d'eau de surface

Date	Point de mesure	Concentration U ($\mu\text{g/L}$)	Rapport isotopique (%)	Incertitude absolue (\pm)
31/12/1976	P2	550	1,161	0,08
		840	4,74	0,04
05/01/1977	P1	300	2,3	0,04
	G31	16	5,69	0,08
13/01/1977	X11	150	3,67	0,15
	X12	260	1,935	0,1
	X13	1110	2,264	0,1
19/01/1977	F5	150	2,94	0,03
20/01/1977	S2E	210	2,14	0,1
	X19	5700	0,81	0,02

29/01/1979	F5		4,3	
	P1		0,93	
	P2	2780	0,72	
	G32	92	0,97	
	G35	200	0,72	
	GAF4	62	0,77	
	X20		0,7	
	X22		0,72	
	Y8		0,81	

10/07/2008	ES3	33	0,707	0,043
------------	-----	----	-------	-------

20/08/2008	CB2	4,44	0,72	0,072
	FEE2	15,64	0,71	0,071
	TRI35	11,38	0,71	0,071
	FGRE	18,46	0,71	0,071
	AEP4ter	5,57	0,71	0,071

15/12/2008	ES1	1,07	0,71	
	ES3	2,9	0,70	
		5,4	0,884	0,044
	ES6	0,86	0,77	
	GAFPG	3,06	0,70	

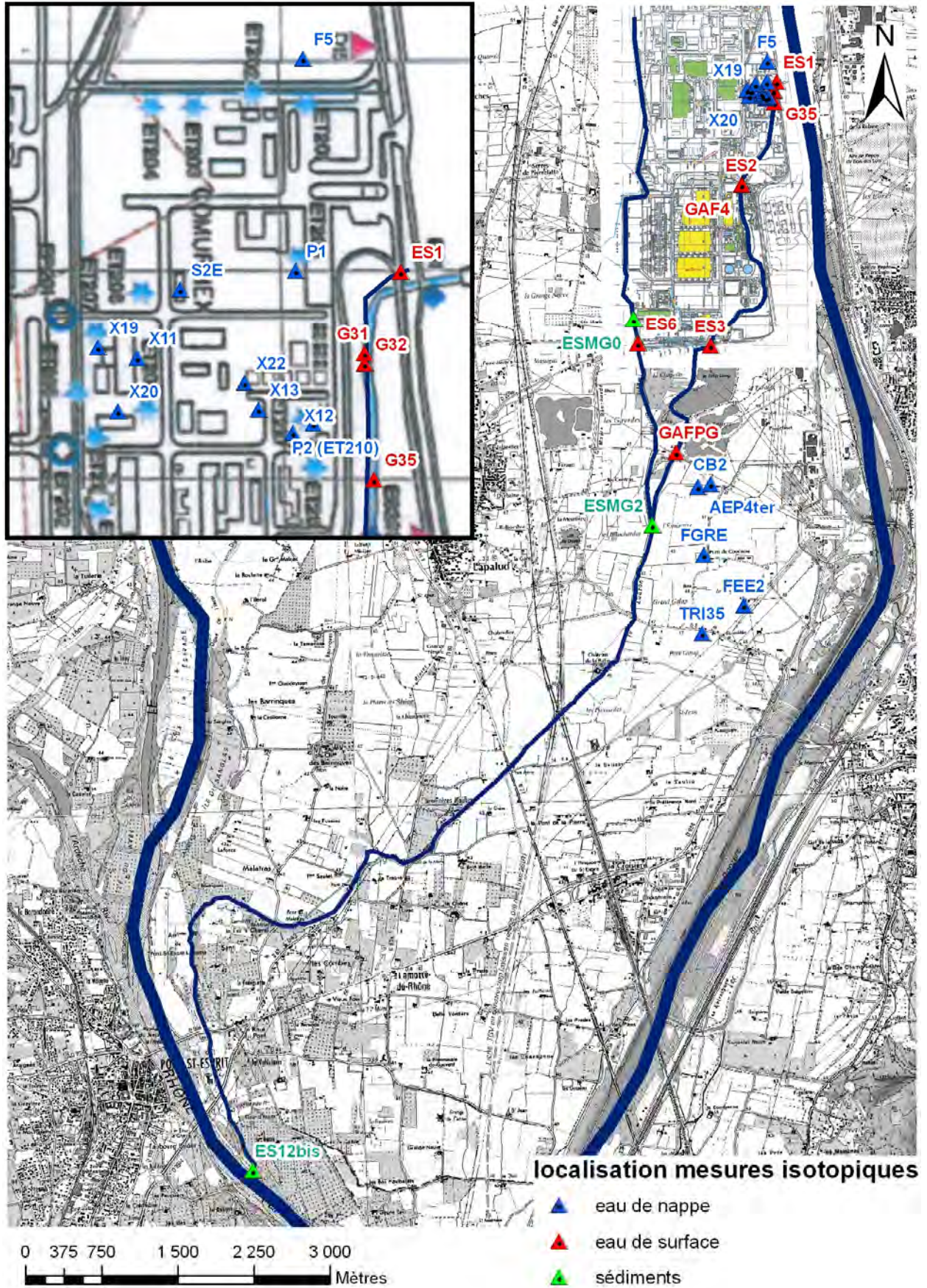
09/02/2010	ES2	13,6	0,762	0,038
	ES3		0,768	0,038

09/03/2010	ES3		0,753	0,038
------------	-----	--	-------	-------

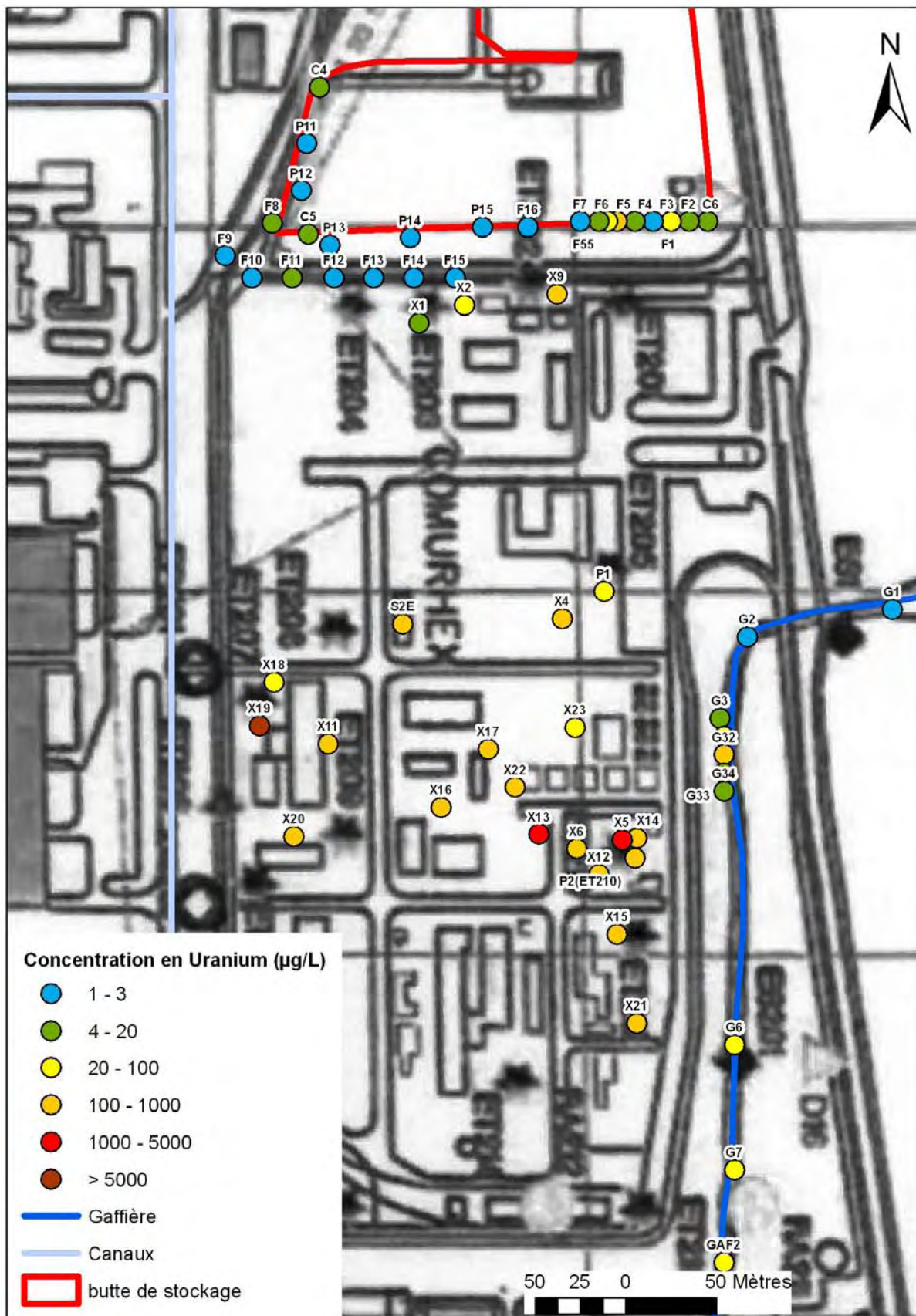
Mesures des teneurs en uranium pondéral et rapports isotopiques sur des prélèvements de sédiments

Date	Point de mesure	Concentration U ($\mu\text{g/L}$)	Rapport isotopique (%)	Incertitude (%)
15/07/2008	ESMG0	236,3	0,77	0,077
	ESMG1bis	169,25	0,75	0,075
	ESMG2	178,28	0,75	0,075
	ES12bis	131,01	0,75	0,075

L'ensemble des points mentionnés précédemment sont reportés sur la figure suivante.



Localisation des points de mesures pour lesquels des analyses isotopiques sont disponibles



Représentation des teneurs moyennes en uranium mesurées entre décembre 1976 et janvier 1977