

# Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre

Phase 3 :  
Acquisition de données complémentaires

Phase 4a :  
Construction du modèle géologique

BRGM/RP-64817-FR  
juin 2015



# Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre

Phase 3 :  
Acquisition de données complémentaires

Phase 4a :  
Construction du modèle géologique

**BRGM/RP- 64817-FR**  
Juin 2015

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 12RSE1407

**David P-Y., Loiselet C., Pannet P., Matthieu F., Lasseur E., Servièrre M.**

## Vérificateur :

Nom : Olivier Douez

Fonction : Responsable Scientifique  
de Programme

Date : 12/06/2015

Signature : 

## Approbateur :

Nom : Didier Pennequin

Fonction : Directeur

Date : 01/07/2015

Signature : 



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

**Mots clés :** Modélisation géologique, Traçage, Piézométrie, Crétacé, Craie, Sables du perche, Cénomanién, Turonien, Coniacien, Santonien, Campanien, Sénonien, Avre, Iton, Blaise, Eure, Haute-Normandie, Centre, Orne, hydrogéologie, traçage, géophysique, modélisation maillée, modèle géologique.

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

David P-Y., Loiselet C., Lasseur E., Matthieu F., Pannet P., Servière M. (2015) - Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre - Phase 3 : Acquisition de données complémentaires - Phase 4a : Construction du modèle géologique - Rapport BRGM/RP-64817-FR. 135 pages, 53 ill., 6 annexes.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

## Synthèse

Un niveau de prélèvements élevé, conjugué aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau souterraine et d'impact écologique sur les masses d'eau superficielles en aval de Verneuil-sur-Avre (27), rend nécessaire une gestion équilibrée et durable de la ressource, qui prendrait à la fois en compte les besoins et les contraintes à respecter pour garantir la préservation et la protection de cette ressource et des milieux aquatiques associés.

Le bassin de l'Avre fait actuellement l'objet d'un SAGE qui vise, entre autre, à sécuriser la distribution en eau potable et à optimiser les prélèvements d'eau dans le bassin.

Sa mise en place nécessite de disposer d'éléments d'appréciation utiles à la planification d'une politique de gestion durable des eaux souterraines dans le bassin.

La DREAL de Haute-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ont donc demandé au BRGM de réaliser une étude, à laquelle se joindra également Eau de Paris (EdP), visant à évaluer l'impact des prélèvements et à définir des règles de gestion volumiques de la ressource en eau sur le bassin de l'Avre.

En réponse à cette sollicitation, le BRGM (DR Haute-Normandie) a conçu un programme d'étude en cinq étapes :

- Phase 1 : Etat de la connaissance : collecte des documents et données disponibles ;
- Phase 2 : Analyse des données : traitement des données et interprétation – bilan hydrologique et besoin éventuel d'acquisition complémentaire de connaissances ;
- Phase 3 : Acquisition de données complémentaires de terrain ;
- Phase 4a : Modélisation géologique numérique du bassin de l'Avre ;
- Phase 4b : Modélisation hydrodynamique des écoulements sur le bassin de l'Avre ;
- Phase 5 : Elaboration de règles de gestion volumiques de la ressource en eau prenant en compte l'analyse des usages et l'impact sur les milieux naturels.

Le rapport BRGM/RP-60458-FR de février 2012 présentait les résultats des phases 1 et 2. Ce rapport a mis en évidence des lacunes de connaissance nécessitant l'acquisition de données complémentaires de terrain avant de pouvoir réaliser une modélisation hydrodynamique de ce bassin (outil de gestion).

Le présent rapport fait état des résultats des phases 3 et 4a.

Au cours de la phase 3 de l'étude, des investigations complémentaires ont été réalisées à savoir :

1. Un multitraçage dont l'objectif était de connaître les exutoires du système karstique de la Meuvette et de la Gervaine (exutoire vers le système karstique des sources de la Vigne ou vers le karst de la Blaise ?) ;

2. L'équipement de 2 lignes de piézomètres en continu entre l'Iton et l'Avre afin de vérifier si la crête piézométrique séparant ces 2 cours d'eau s'efface en période de basses eaux (hypothèse mise en évidence ou supposée à la fois par les cartes piézométriques régionales de basses eaux, par les cartes piézométriques de 1990/1991 réalisées par Burgeap [3] et par G. Souchet de Eau de Paris en 1994 [23]) ;
3. La réalisation d'une campagne géophysique dont l'objectif était de mieux comprendre le schéma structural de la partie médiane du bassin de l'Avre et, notamment, de valider ou non l'hypothèse émise par BURGEAP en 1991 [3], qui supposait la présence d'un faisceau de failles dans ce secteur avec un amas d'argile faisant barrage à l'écoulement du karst du bloc Ouest, provoquant la résurgence de l'aquifère amont. Seize panneaux électriques répartis sur 6 profils d'une longueur variant entre 870 et 1 590 m ont été réalisés en configuration dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Le linéaire total est de 8 490 m.

Ces investigations ont montré les résultats suivants :

1. Dans les conditions hydrogéologiques de l'été 2013, les résultats du traçage n'ont pas montré de connexion karstique entre les BV de l'Avre et de la Blaise. Le système karstique de la Gervaine et de la Meuvette ne semble pas non plus connecté au système karstique des sources de la Vigne. Seule une restitution a été constatée sur des sources situées dans la vallée de la Meuvette (résurgences n°02158X0050/HY à 02158X0053/HY). Les vitesses maximales de transit, entre les points d'injection et ces sources, sont comprises entre 118 et 139 m/h. Il convient de souligner qu'une incertitude existe au niveau des résultats (qui montrent l'absence de restitution du traceur), liée à la nature non optimum du traceur dans le cas de longues distances séparant le point d'injection des points de surveillance ;
2. Concernant le suivi en continu des niveaux sur les deux lignes de piézomètres, sur la période allant de mars 2013 à avril 2014, la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans le secteur des Barils semble bien marquée. En revanche, dans le secteur de Verneuil-sur-Avre, la crête piézométrique est présente au niveau de Piseux mais semble peu marquée (2,14 m au-dessus de l'Iton le 11-12-2013 et 0,88 m au-dessus de l'Iton le 06/05/2014). Or le cycle hydrologique qui a fait l'objet de ce suivi se situait dans un niveau de moyennes eaux pluriannuelles. Il n'est donc ainsi pas à exclure que la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans ce dernier secteur disparaisse lors des périodes de basses eaux pluriannuelles. Il serait nécessaire de poursuivre à plus long terme le suivi des niveaux de nappes sur les piézomètres de Piseux ;
3. Enfin, dans le cadre de la campagne géophysique, 6 coupes géo-électriques ont été établies et ont mis en évidence des discontinuités verticales qui ont été assimilées à des failles. Le faisceau de faille F1 et, plus particulièrement F1a, est probablement associé à une zone de fracturation et d'argilisation marquée par la présence d'une anomalie conductrice sub-v verticale approximativement centrée sur cette faille F1a. Cette zone d'argilisation conductrice constituerait un barrage à l'écoulement des eaux de l'aquifère du Turonien et expliquerait la présence des sources en amont de cette barrière étanche. Plus au Nord, en direction de Breteuil, le fonctionnement du faisceau F1 serait différent : aucune des failles constituant ce faisceau n'est associée à une anomalie conductrice marquant la présence d'une zone d'argilisation. On peut donc supposer que cette structure aurait, plus au Nord, un caractère plutôt drainant.

A l'issue de ce travail d'acquisition de données, une modélisation géologique du bassin de l'Avre en 3D a été réalisée (phase 4a). L'objectif du travail a été de construire un modèle géologique numérique en 3D en vue de fournir la géométrie des réservoirs au modèle hydrogéologique.

Le logiciel GDM-Multilayer 2014 (BRGM) a été utilisé pour la construction du modèle géologique en trois dimensions. Onze formations géologiques ont été modélisées :

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
ALLU		ALLUVIONS		F11
ARGS	EROD	ARGILES à Silex	B11	F10
SENA	EROD	SENonien Altéré	B10	F09
SENO	EROD	SENonien	B09	F08
CENS		CENomanien Supérieur	T07	F07
PERC		Sable de PERChe	T06	F06
CENA	EROD	CENomanien inférieur Altéré	T05	F05
CENI		CENomanien Inférieur	B05	F04
CENB		CENomanien Basal	T03	F03
GAUL		GAULt	T02	F02
BASE	EROD	BASE	B02	F01

Le travail de modélisation a consisté (i) à compiler, préparer, et mettre en cohérence les données nécessaires à la construction du modèle ; (ii) à interpoler ces données ; (iii) à combiner les surfaces modélisées.

Le modèle géologique reproduit la géométrie des structures du bassin de l'Avre en trois dimensions, de laquelle sont également extraites des coupes géologiques en 2 dimensions.

Les résultats de la modélisation sont fournis sous forme de cartes montrant l'altitude du toit ou mur des différents horizons géologiques, leurs épaisseurs, ainsi que de coupes géologiques sélectionnées.

Des fichiers d'exports du modèle ont été réalisés sous forme de grilles de l'altitude des toits et murs des horizons modélisés, et qui seront ensuite importés dans le modèle hydrodynamique *Marthe* pour la simulation des écoulements.



## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Rappel des préconisations du rapport de phases 1 et 2 .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Investigations complémentaires : campagne de traçages .....</b>	<b>17</b>
3.1. CONTEXTE ET OBJECTIF .....	17
3.2. DISPOSITIF D'INJECTION : RIVIERES MEUVETTE ET GERVAINE .....	18
3.3. DISPOSITIF DE SURVEILLANCE : .....	20
3.4. RESULTATS DU MULTITRAÇAGE .....	21
<b>4. Investigations complémentaires : suivi en continu de piézomètres entre l'Avre et l'Iton</b>	<b>23</b>
4.1. CONTEXTE .....	23
4.2. OBJECTIF DES INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES .....	29
4.3. RESULTATS .....	30
<b>5. Investigations complémentaires : campagne géophysique .....</b>	<b>33</b>
5.1. OBJECTIFS .....	33
5.2. METHODOLOGIE ET MISE EN OEUVRE .....	33
5.3. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES .....	34
5.3.1. Personnel et calendrier .....	34
5.3.2. Matériel .....	34
5.3.3. Travaux réalisés .....	35
5.3.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques .....	37
5.3.5. Traitement et inversion .....	37
5.3.6. Présentation des coupes de résistivité inversée .....	38
5.4. RESULTATS .....	38
5.4.1. Apport des informations géologiques disponibles sur le secteur .....	38
5.4.2. Interprétation des données géophysiques en termes de géologie et d'hydrogéologie .....	38
5.4.3. Schéma structural du secteur d'étude .....	40
5.4.4. Synthèse de l'interprétation structurale .....	42
<b>6. Construction du modèle géologique 3D .....</b>	<b>47</b>
6.1. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES .....	47
6.1.1. Jurassique .....	47

6.1.2. Crétacé inférieur.....	48
6.1.3. Crétacé supérieur.....	49
6.1.4. Formations superficielles.....	52
6.2. LIMITE GEOGRAPHIQUE DES FORMATIONS ALLUVIONS ET SABLES DU PERCHE ..	54
6.3. SCHEMA STRUCTURAL : DEFINITION DU RESEAU DE FAILLES .....	57
6.4. PRINCIPE DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D SOUS GDM-MULTILAYER .....	60
6.5. TRANSFERT DES DONNEES VERS GDM.....	62
6.6. LA PILE STRATIGRAPHIQUE .....	62
6.7. PREPARATION DE LA DONNEE DISPONIBLE .....	63
6.7.1. MNT (Modèle Numérique de Terrain).....	63
6.7.2. Carte géologique synthétique.....	64
6.7.3. Identification et codage de « logs » .....	65
6.8. CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE .....	71
6.8.1. Définition de la grille de calcul .....	71
6.8.2. Codage des données .....	71
6.8.3. Mise en cohérence des données.....	71
6.8.4. Méthode d'interpolation.....	73
6.8.5. Construction du modèle et gestion des inégalités.....	75
6.8.6. Combinaison des surfaces .....	79
6.8.7. Compléments au modèle .....	79
6.9. RESULTATS DU MODELE.....	84
6.9.1. Exemple de documents graphiques .....	85
6.9.2. Description synthétique du modèle géologique obtenu .....	90
6.10. VALIDATION DU MODELE.....	92
6.10.1. Comparaison des coupes 2D issues du modèle avec les coupes géologiques .....	92
6.10.2. Comparaison des coupes 2D issues du modèle avec les profils de résistivité électrique (cf. § 5) .....	94
6.10.3. Comparaison entre les cartes d'épaisseur (1) de la formation argiles à silex, issue du modèle et (2) des formations résiduelles (argiles à silex), extraite de la thèse de F. Quesnel (1997) .....	95
6.11. MODELE GEOLOGIQUE AVEC LES FORMATIONS DE CRAIES ALTEREES.....	97
6.12. RESTITUTION/EXPORT DU MODELE GEOLOGIQUE.....	100
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>101</b>
<b>8. Bibliographie.....</b>	<b>103</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Position des traits de coupe AB et CD (traits jaunes) - ces coupes sont présentées à l'illustration 2.....	17
Illustration 2 : Coupes topographiques transbassins Avre / Blaise – et illustration des relations karstiques potentielles à tester par traçage (flèche noires) .....	18
Illustration 3 : Plans de localisation de points d'injection .....	19
Illustration 4 : Dispositif de surveillance de la campagne de traçage .....	20
Illustration 5 : Coupe traversant le bassin de l'Avre et celui de l'Iton amont en passant par les piézomètres de Saint-Christophe-sur-Avre, Les barrils et Les Ressuintes (note concernant la légende : HE = Hautes-Eaux ; ME = Moyennes eaux ; BE = Basses eaux) .....	23
Illustration 6 : Coupe géologique de Breteuil au Breuil passant par les points Br, L D, G, S, C, B (figure de droite) et position de ces points sur la carte (figure de gauche) - G. Souchet (1994) (le niveau piézométrique de la nappe figure en tireté simple) .....	25
Illustration 7 : Bassin d'alimentation probable de la Source du Breuil (périmètre bleu) selon G. Souchet (1994) .....	27
Illustration 8 : Piézomètres faisant l'objet d'un suivi depuis septembre 2013 pour étudier la pérennité de la crête piézométrique séparant les Bassins de l'Iton et de l'Avre.....	29
Illustration 9 : Coupe topographique et piézométrique réalisée entre l'Avre et l'Iton dans le secteur des Barils (secteur « amont ») .....	31
Illustration 10 : Coupe topographique et piézométrique réalisée entre l'Avre et l'Iton dans le secteur de Verneuil sur avre (secteur « bras forcé »).....	31
Illustration 11 : Coupe supposée de BURGEAP, 1991 [3] .....	33
Illustration 12 : Caractéristiques des panneaux électriques.....	35
Illustration 13 : Carte de localisation des différents profils géophysiques réalisés .....	36
Illustration 14 : Carte structurale supposée à l'issue des investigations géophysiques .....	43
Illustration 15 : Log schématique des formations rencontrées au droit de la zone d'étude .....	48
Illustration 16 : Délimitation nette de l'affleurement des sables du perche au niveau de la faille de Senonches.....	50
Illustration 17 : Répartition schématique des formations superficielles sur substratum crayeux de l'Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al. 1996).....	53
Illustration 18 : Carte de la géométrie et de l'extension des sables du Perche .....	56
Illustration 19 : Coupe géologique montrant la géométrie et l'extension des Sables du Perche .....	56
Illustration 20 : Carte géologique et réseau de failles principales .....	57
Illustration 21 : Principe de modélisation avec GDM-Multilayer .....	60
Illustration 22 : Pile litho-stratigraphique utilisée pour la modélisation géologique .....	62
Illustration 23 : Modèle Numérique de Terrain .....	64
Illustration 24 : Carte géologique.....	65
Illustration 25 : Logs de référence 01506X0005 .....	68
Illustration 26 : Carte des logs de référence identifiés .....	67

Illustration 27 : Carte de l'ensemble des données disponibles dans la BSS (A) et tableau récapitulatif des travaux effectués sur l'ensemble des données (B) .....	66
Illustration 28 : Exemple de codification d'un sondage vérifié .....	69
Illustration 29 : Exemple de log possédant le document foreur (A), le log vérifié (B). La table (C) est la codification selon la pile géologique définie pour le modèle .....	70
Illustration 30 : Table de codification des forages .....	70
Illustration 31 : Carte de cohérence entre la carte géologique et la première passe des sondages .....	72
Illustration 32 : Carte de cohérence entre sondages et limites d'extension maximales des formations géologiques des alluvions (A), des sables du Perche (B) .....	73
Illustration 33 : Analyse géostatistique du toit de la formation CENomanien Supérieur (CENS).....	75
Illustration 34 : Carte des points de contrainte imposés dans le modèle selon leur codification .....	76
Illustration 35 : Grille des surfaces des toit et mur de la formation Gault des données SIG compilées dans l'atlas hydrogéologique de la Haute-Normandie de 2010 ( <a href="http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article283">http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article283</a> ) (A) Carte de distribution des points de la grille utilisée ; (B) coupe géologique ssw-nne le long de l'emprise indiquant la géométrie des surfaces par des points rouges (toit du Gault), marrons (mur du Gault) .....	77
Illustration 36 : Carte géologique des alluvions (ALLU) en rouge (selon l'emprise définie).....	78
Illustration 37 : Pile géologique du modèle avec les formations de craies altérées. ....	80
Illustration 38 : Principe de la méthode de modélisation appliquée pour la construction du modèle géologique avec prise en compte des formations de craies altérées. ....	80
Illustration 39 : Carte de l'épaisseur de la formation CENA interpolée à partir des points de passage imposés (rond noir) : valeurs associées à ces points sont de 15 m dans l'axe de Senonches, 0 m au Nord de la faille de Senonches.....	81
Illustration 40 : Carte brute de l'épaisseur de la formation SENA : dans le polygone il est imposé une épaisseur de 30 m (en rouge) ; à l'extérieur du polygone, l'épaisseur est de 15 m ; dans l'emprise des sables du Perche l'épaisseur est de 0 m .....	82
Illustration 41 : Carte interpolée de l'épaisseur de la formation SENA : interpolation de la grille brute (Illustration 40) par moyenne mobile (rayon d'influence de 500 m) .....	83
Illustration 42 : Vue 3D du modèle .....	84
Illustration 43 : Vues 3D de chaque surface modélisée et représentation de 3 coupes brisées.....	85
Illustration 44 : Cartes de la formation CENomanien Supérieur (CENS) .....	87
Illustration 45 : Coupes géologiques (lignes brisées).....	89
Illustration 46 : Table des coordonnées du début et fin des profils .....	90
Illustration 47 : Comparaison entre les coupes des notices des cartes géologique et leur analogue provenant du modèle. ....	94
Illustration 48 : Table des coordonnées du début et fin des profils .....	94
Illustration 49 : Comparaison entre les coupes des profils géophysiques (résistivité électrique présentés au §5) et son analogue provenant du modèle .....	95
Illustration 50 : Table des coordonnées du début et fin des profils .....	95
Illustration 51 : Cartes des épaisseurs de la formation des argiles à silex.....	96
Illustration 52 : Coupes géologiques (lignes brisées).....	98
Illustration 53 : Carte d'altitude de la base des couches de craie altérée .....	99

## Liste des annexes

Annexe 1 - Campagne de traçage de 2013 : rapport IDDEA n°IC130157 version C de janvier 2014 présentant les résultats .....	107
Annexe 2 - Carte des altitudes des formations modélisées (Grille 2D) .....	109
Annexe 3 - Carte des épaisseurs des formations modélisées (Grille 2D) .....	111
Annexe 4 - Carte de localisation des coupes verticales.....	113
Annexe 5 - Résultats de la campagne de géophysique de 2013.....	117
Annexe 6 - Principe du panneau électrique .....	127



# 1. Introduction

Un niveau de prélèvements élevé, conjugué aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau souterraine et d'impact écologique sur les masses d'eau superficielles en aval de Verneuil-sur-Avre (27), rend nécessaire une gestion équilibrée et durable de la ressource, qui prendrait à la fois en compte les besoins et les contraintes à respecter pour garantir la préservation et la protection de cette ressource et des milieux aquatiques associés.

Le bassin de l'Avre fait actuellement l'objet d'un SAGE qui vise, entre autre, à sécuriser la distribution en eau potable et à optimiser les prélèvements d'eau dans le bassin.

Sa mise en place nécessite de disposer d'éléments d'appréciation utiles à la planification d'une politique de gestion durable des eaux souterraines dans le bassin.

La DREAL de Haute-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ont donc demandé au BRGM de réaliser une étude, à laquelle se joindra également Eau de Paris (EdP), visant à évaluer l'impact des prélèvements et à définir des règles de gestion volumiques de la ressource en eau sur le bassin de l'Avre.

En réponse à cette sollicitation, le BRGM (DR Haute-Normandie) a conçu un programme d'étude en cinq étapes :

- Phase 1 : Etat de la connaissance : collecte des documents et données disponibles ;
- Phase 2 : Analyse des données : traitement des données et interprétation – bilan hydrologique et besoin éventuel d'acquisition complémentaire de connaissances ;
- Phase 3 : Acquisition de données complémentaires de terrain ;
- Phase 4a : Modélisation géologique numérique du bassin de l'Avre ;
- Phase 4b : Modélisation hydrodynamique des écoulements sur le bassin de l'Avre ;
- Phase 5 : Elaboration de règles de gestion volumiques de la ressource en eau prenant en compte l'analyse des usages et l'impact sur les milieux naturels.

Le rapport BRGM/RP-60458-FR de février 2012 présentait les résultats des phases 1 et 2. Ce rapport a mis en évidence des lacunes de connaissance nécessitant l'acquisition de données complémentaires de terrain avant de pouvoir réaliser une modélisation hydrodynamique de ce bassin (outil de gestion).

Ce rapport présente les résultats des phases 3 (acquisition de données complémentaires) et 4a (modélisation géologique du bassin de l'Avre).



## 2. Rappel des préconisations du rapport de phases 1 et 2

L'étude préalable (rapport BRGM/RP-60458-FR de février 2012 de phases 1 et 2) a mis en évidence des lacunes de connaissances nécessitant d'acquérir des données complémentaires de terrain ; ainsi il était recommandé :

1. **Concernant l'hypothèse d'un drainage du bassin de l'Iton amont par l'Avre en période de basses eaux** : il serait nécessaire de confirmer ce constat par la réalisation d'une carte piézométrique locale avec une densité de points de mesures suffisante pour vérifier l'effacement de la crête en période de Basses Eaux. Une autre possibilité serait d'implanter un piézomètre au niveau de la crête piézométrique et de réaliser un suivi en continu des niveaux (si l'altitude piézométrique est inférieure à celle du lit de l'Iton alors cela indiquerait que l'Iton amont est drainé vers le bassin de l'Avre) ;
2. **Concernant l'hypothèse de la faille de Verneuil qui ferait écran aux écoulements souterrains**. Une prospection géophysique serait nécessaire pour vérifier cette hypothèse ;
3. **Concernant la connexion karstique interbassins** : réaliser des traçages pour vérifier l'absence de drain karstique le long de la faille supposée de Breteuil à Verneuil ; tester d'éventuelles connexions karstiques entre les bassins hydrogéologiques de l'Avre et la Blaise amont ;
4. **Il conviendrait de réaliser une deuxième campagne de jaugeages** pour valider les résultats de la première campagne ;
5. **Concernant l'extension des sables du perche au Nord de la faille de Senonches** : vérifier l'extension des sables du perche en réalisant des sondages suffisamment profonds ;
6. **Concernant les pertes de débits du bras forcé de l'Iton** : une enquête serait à mener pour voir s'il s'agit de pertes régulières le long de son cours (karst) ou de prélèvements ;
7. **La mise en place d'un doublet de stations de jaugeage en amont de Verneuil-sur-Avre et à l'aval de la zone de résurgence**, permettrait de mettre en place un suivi quantitatif par bassin amont/aval selon la cohérence du fonctionnement hydrogéologique du bassin ;
8. **Concernant la connexion hydraulique entre les sables du Perche (blocs surélevés entre la faille de l'Eure et la faille de Senonches) et l'aquifère de la Craie** : réalisation d'une carte piézométrique précise de part et d'autre de la faille de Senonches afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique dans ce secteur ; réalisation de datation des eaux souterraines ;
9. **Concernant la connaissance des prélèvements** :
  - mise en place systématique de compteurs pour les forages de prélèvements (quel que soit l'usage, forages agricoles y compris),
  - un suivi mensuel des prélèvements (et non annuel) par les différents acteurs de l'eau du bassin est indispensable à une gestion équilibrée de la ressource.

Parmi cette liste de préconisations, le Comité de Pilotage avait retenu la réalisation des recommandations n°1 à 4 ci-dessus.

Ces investigations ont été réalisées en 2012 et 2013. Leurs résultats sont présentés dans les paragraphes 3 à 5 du présent rapport.



### 3. Investigations complémentaires : campagne de traçages

#### 3.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

L'objectif principal de l'opération de traçage a été de préciser les relations entre le bassin de l'Avre et le bassin voisin de la Blaise. Les vallées de la Gervaine et de la Meuvette connaissent, comme les autres affluents de la rive droite de l'Avre des pertes sur une partie de leur parcours. Aucun traçage réalisé sur ces cours d'eau n'a cependant été recensé dans la bibliographie (cf. Illustration 1). Le karst situé sous les cours d'eau de la Meuvette et de la Gervaine appartient-il au réseau karstique de sources de la vigne ? au réseau karstique de la Blaise ? ou est-ce un réseau karstique ayant ses propres exutoires ?

L'objectif de cette opération de traçage a donc été de tester les éventuelles connexions karstiques entre les pertes de la vallée de la Gervaine ou de la Meuvette et les sources de la Vigne à l'Ouest, les résurgences de la Blaise à l'Est et les résurgences situées à la confluence de ces cours d'eau avec l'Avre au Nord (cf. Illustration 1 et 2).

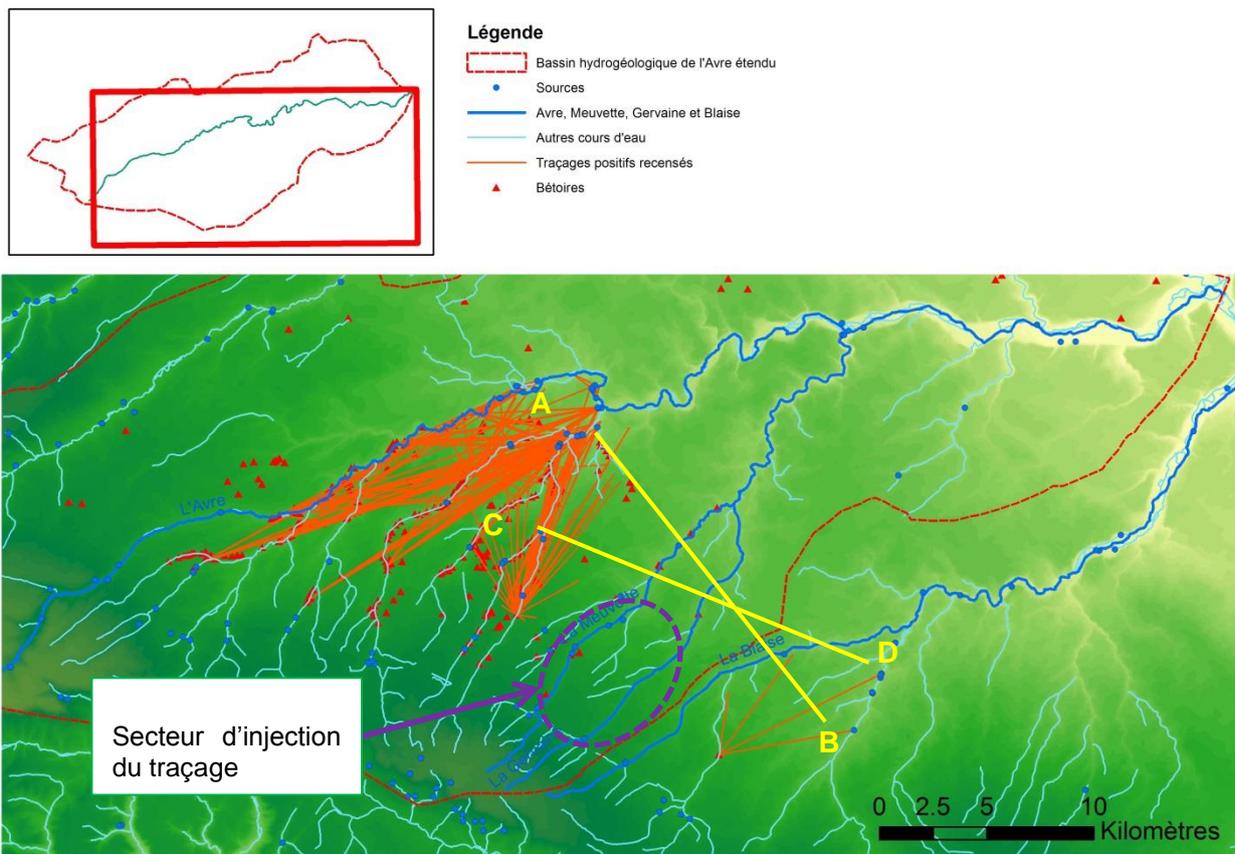
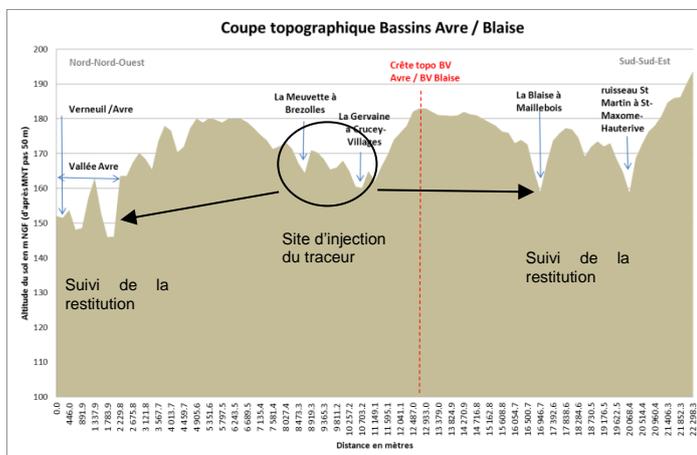
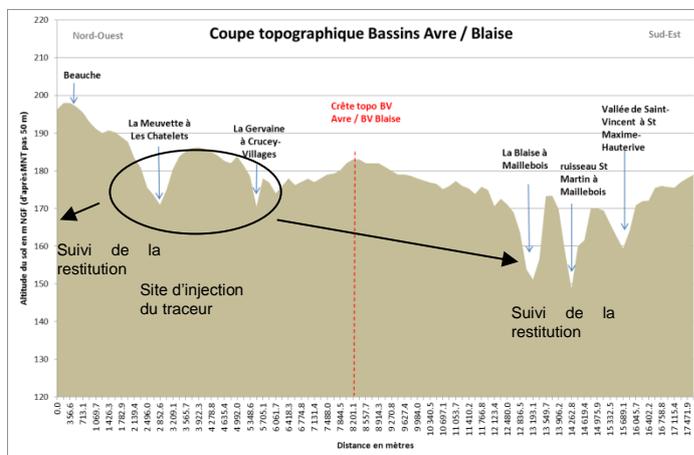


Illustration 1 : Position des traits de coupe AB et CD (traits jaunes) - ces coupes sont présentées à l'illustration 2



Coupe A – B



Coupe C – D

Illustration 2 : Coupes topographiques transbassins Avre / Blaise – et illustration des relations karstiques potentielles à tester par traçage (flèche noires)

La mise en œuvre de ce traçage a été confiée au bureau d'études IDDEA avec l'aide du garde rivière du SIVA (M. Vallon). L'opération s'est déroulée en juillet et août 2013. Le détail de cette opération de traçage a fait l'objet d'un rapport (rapport IDDEA n°IC130157 version C de janvier 2014). Ce rapport est présenté en annexe 1.

Un bref résumé est présenté dans les §3.2 à §3.4 suivants.

### 3.2. DISPOSITIF D'INJECTION : RIVIERES MEUVETTE ET GERVAINE

Malgré les pertes indiquées sur les cartes IGN et celles recensées dans l'inventaire régional, lors des repérages terrain de janvier 2013, aucune perte bien individualisée n'était visible dans ou à proximité du lit des cours d'eau de la Meuvette et de la Gervaine.

Il a donc été décidé d'injecter le traceur de manière simultanée directement dans les 2 cours d'eau (Illustration 3) :

- dans la Gervaine au lieu-dit « la Corbinière »,
- dans la Meuvette à l'aval immédiat du ruisseau des Souches.

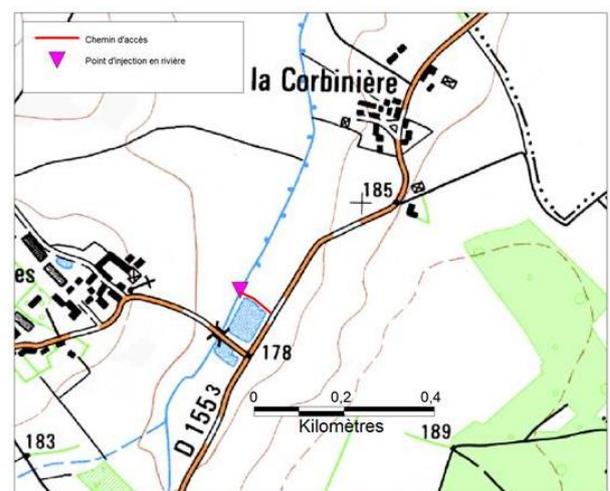
L'injection a été réalisée le 15 juillet 2013 (en début de soirée).

A la demande des collectivités exploitant les différents captages AEP susceptibles d'être atteints par une restitution, il a été décidé de ne pas utiliser de traceur pouvant provoquer une coloration des eaux captées pour l'AEP. Un seul traceur a donc été utilisé pour les deux traçages : le Naphtionate de Sodium réputé « incolore ». Aucun traceur n'étant idéal, le naphtionate présente les inconvénients suivants :

- Fluorescence dans la même gamme de fluorescence que la matière organique naturelle, impliquant un bruit de fond qui peut être important ; en conséquence, la limite de détection du Naphthionate est moins bonne que celle de la Fluorescéine ;
- Les essais comparatifs en milieux poreux indiquent un taux de restitution significativement plus faible que pour la Fluorescéine. Cela laisse supposer que le naphthionate est soumis à une adsorption irréversible aux échelles de temps considérées ou à une dégradation ;
- Ce traceur est généralement recommandé pour des traçages sur de courtes distances ou pour des systèmes où les circulations sont supposées directes et rapides ;

Du fait des inconvénients listés précédemment, il a été nécessaire d'injecter des quantités de naphthionate plus importantes que celles généralement utilisées pour la fluorescéine. Au regard de la distance entre les points d'injection et les points de suivi les plus éloignés, la quantité de traceur injecté s'élève à 60 kg par point d'injection, soit 120 kg au total.

L'utilisation d'un même traceur en deux points différents ne permet pas une interprétation différenciée. En d'autres termes, lors de la restitution du traceur en un point de suivi, il n'est pas possible d'en définir l'origine. Les injections ont été réalisées en fin de journée ou début de nuit, afin de limiter les risques de dégradation du traceur par les UV émis par le soleil.



Point d'injection sur la Meuvette

Point d'injection sur la Gervaine

Illustration 3 : Plans de localisation de points d'injection

### 3.3. DISPOSITIF DE SURVEILLANCE :

Le dispositif de surveillance (points de surveillance et matériels mis en place) est présenté à l'illustration 4.

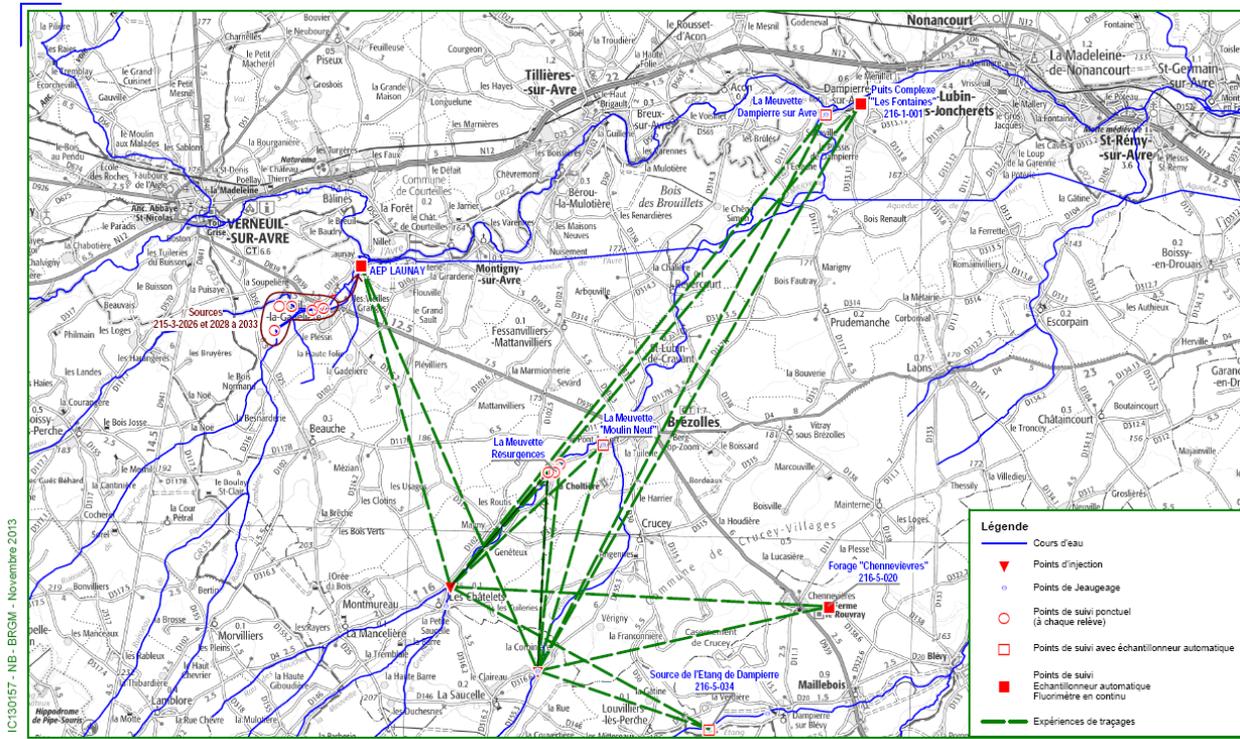


Illustration 4 : Dispositif de surveillance de la campagne de traçage

Les points de surveillance ont été les suivants :

- **Dans le bassin versant de la Blaise :**
  - 1 préleveur automatique à la source de l' « Etang de Dampierre » (02165X0034) située sur la commune de Maillebois (dpt 28) à environ 5 km au Sud-Est de l'injection ;
  - 1 préleveur automatique au forage « Chennevieres » (02165X0020) - Captage AEP de la commune de Maillebois à Maillebois (à environ 6,7 km à l'Est de l'injection) ;
- **Dans le bassin versant de l'Avre :**
  - 1 préleveur automatique au niveau du déversoir de launay. Ce déversoir recevait lors de la campagne de traçage les sources de la Vigne suivantes : Sce de Rivière (02153X2033), Sce de Gravieres (02153X2031), Sce de Foisys (02153X2032), Sce du Blaou (02153X2030), Sce Ganderolles (02153X2029), Sce du Chêne (02153X2028) (AEP Eau de Paris) situées à environ 7 km au Nord-Ouest de l'injection ; Il est à noter que la source d'Erigny (02153X2026) (faisant également partie du groupe des sources de la vigne) ne convergeait pas vers le déversoir de launay lors de l'opération. La source d'Erigny a cependant fait l'objet d'un échantillonnage ponctuel à chaque relève ;

- 1 préleveur automatique au puits 02161X0001 – Les Fontaines – Captage AEP de la commune de Dampierre à Dampierre-sur-Avre situé à environ 15 km au Nord-Est de l'injection ;
  - 1 préleveur automatique au niveau de la rivière la Meuvette à l'amont immédiat du groupe de résurgence (n°BSS 02158X0050/HY à 02158X0053/HY) situé sur le cours d'eau entre les lieu-dit la Valterie et les Brosses à l'amont du bourg de Brezolles ;
  - 1 préleveur automatique au niveau de la rivière la Meuvette au « moulin neuf » à l'aval immédiat de ce groupe de résurgences ;
  - 1 préleveur automatique au niveau de la rivière la Meuvette à l'amont immédiat de sa confluence avec l'Avre.
- **Matériel complémentaire mis en place pour le suivi :**
    - Les 3 captages AEP ont été équipés, en plus du préleveur automatique, d'un fluorimètre de terrain (mesure en continu) muni d'une télétransmission permettant de donner l'alerte à la collectivité AEP en cas d'arrivée du traceur sur son captage.
    - Les données de débits ont été récupérées auprès de l'exploitant pour les captages qui en sont équipés ; une campagne de jaugeage des rivières a par ailleurs été réalisée.

### 3.4. RESULTATS DU MULTITRAÇAGE

Les résultats sont présentés en détail dans le rapport IDDEA de l'annexe 1.

Le traçage qui a consisté à injecter 120 kg de Naphtionate de Sodium répartis en 2 points d'injection (un sur la Meuvette et un sur la Gervaine) et à suivre sa restitution durant 40 jours notamment aux captages AEP de Dampierre sur Avre, de Dampierre sur Blévy et de Launay a essentiellement donné des résultats négatifs, tant au niveau du suivi en continu au fluorimètre de terrain que des sites d'échantillonnage automatique.

Seule une restitution d'environ 1,6 kg a été constatée sur la Meuvette, au niveau des résurgences n°02158X0050/HY à 02158X0053/HY (située à l'amont du Moulin Neuf). Les vitesses maximales de transit sont comprises entre 118 et 139 m/h.

Dans les conditions hydrogéologiques de l'été 2013, au moment des traçages, les résultats sur les 2 points de suivi du bassin versant (BV) de la Blaise n'ont pas montré de connexion karstique entre les bassins versants de l'Avre et de la Blaise. Le système karstique de la Gervaine et de la Meuvette ne semble pas relié au système karstique des sources de la Vigne. Il est toutefois rappelé l'incertitude qui demeure liée à la nature du traceur, moins bien adapté dans le cas des situations comme celle-ci, avec une relativement longue distance qui sépare le point d'injection des points de surveillance.

Le faible taux de restitution sur la Meuvette au Moulin Neuf peut s'expliquer notamment par le tarissement de la Gervaine, puis de la Meuvette peu de temps après les injections. En effet, la Naphtionate de Sodium n'a pas atteint ce point de suivi par trajet de surface.

Au regard de ces incertitudes, du contexte hydrogéologique, du nombre restreint de points de suivi et des résultats obtenus, nous ne pouvons à ce stade raisonnablement pas conclure qu'aucune connexion entre les deux bassins n'existe.



## 4. Investigations complémentaires : suivi en continu de piézomètres entre l'Avre et l'Iton

### 4.1. CONTEXTE

Les cartes piézométriques départementales et régionales disponibles semblent indiquer que la crête piézométrique séparant les bassins de l'Avre et de l'Iton Amont est présente sur les cartes de Hautes Eaux, mais semble s'effacer sur la carte de Basses Eaux (cartes piézométriques de 2001 et 2006). Ainsi, le bassin versant amont hydrogéologique de l'Iton serait inclus dans le bassin hydrogéologique de l'Avre en période de Basses Eaux.

Ce constat est illustré par la coupe de l'illustration 5 qui montre que l'altitude du lit de l'Iton amont est bien supérieure à l'altitude du lit de l'Avre et, qu'en période de basses eaux, le bassin de l'Iton amont serait drainé par celui de l'Avre. Cette coupe a été réalisée à partir des cartes piézométriques de l'Atlas de Haute-Normandie 2010 et des données des trois piézomètres des Barrils (suivi sur 2 ans en 1982 et 1983 en période de hautes eaux interannuelles), de St-Christophe-sur-Avre (suivi depuis 2007, période de basses eaux interannuelles) et des Ressuintes. Il convient toutefois de souligner que le dôme de la carte Hautes Eaux (2001) qui apparaît entre l'Iton et L'Avre (en pointillé bleu sur la coupe) vient du fait que le cours d'eau temporaire « La Vallée des Noës » situé entre l'Avre et l'Iton a été pris comme point de contrainte pour établir la piézométrie de Hautes eaux. Mais, d'après le piézomètre des Barils suivi entre 1982 et 1983 (période de Hautes Eaux interannuelles), cette hypothèse semble en fait peu probable.

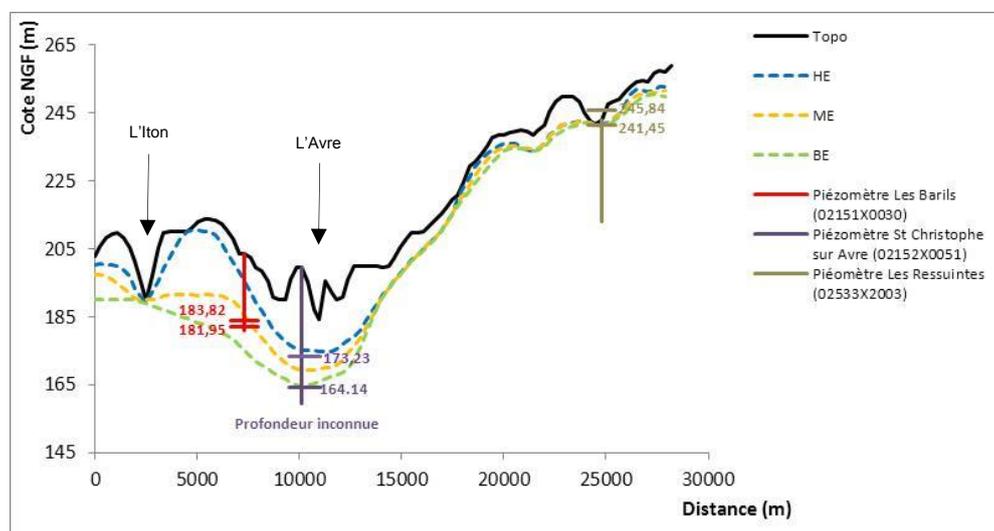


Illustration 5 : Coupe traversant le bassin de l'Avre et celui de l'Iton amont en passant par les piézomètres de Saint-Christophe-sur-Avre, Les barrils et Les Ressuintes (note concernant la légende : HE = Hautes-Eaux ; ME = Moyennes eaux ; BE = Basses eaux)

Etant donné en plus que les isopièzes utilisées sont des isopièzes de cartes départementales réalisées au 1/100 000<sup>ème</sup>, il serait nécessaire pour avancer sur ce point de réaliser une carte piézométrique locale fine, avec une densité de points de mesures suffisante. Il est à noter

toutefois qu'une carte piézométrique locale a déjà été dressée en 1990/1991 sur ce secteur : le Burgeap a effectivement réalisé deux levés piézométriques de la nappe en novembre 1990 (étiage) et mars-avril 1991 (hautes eaux saisonnières et basses eaux inter-annuelles) afin de déterminer le bassin d'alimentation des sources captées par Eau de Paris. Ces levés ont été réalisés avec une densité de points relativement importante (257 et 285 mesures sur puits pour une surface d'environ 300 km<sup>2</sup>). Pour la carte de hautes eaux, la zone de mesures avait été étendue vers l'Iton afin d'appréhender l'éventuelle existence d'une capture partielle des eaux du bassin de l'Iton par celui de l'Avre. Suite à ces mesures, le Burgeap a précisé dans son rapport que la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton n'était effectivement pas bien marquée, et que des doutes persistaient.

Cette hypothèse d'extension du bassin hydrogéologique de l'Avre a aussi été émise par G. Souchet (1994) qui supposait alors une remontée du bassin d'alimentation des sources du Breuil vers le Nord, au-delà du bassin topographique de l'Avre, jusqu'à l'Iton, mais n'atteignant pas le secteur de Breteuil (cf. carte de l'illustration 7). Il s'appuyait pour cela à la fois sur la piézométrie, la présence de failles supposées et l'analogie constatée au niveau de la composition chimique des sources du Breuil et de celle de St Lambert située à Condé-sur-Iton, qui, selon lui, se situeraient toutes dans la même aire d'alimentation. Il a notamment réalisé une coupe géologique de Breteuil au Breuil montrant une absence de crête piézométrique marquée séparant les bassins de l'Avre et de l'Iton sur ce secteur (Illustration 6).

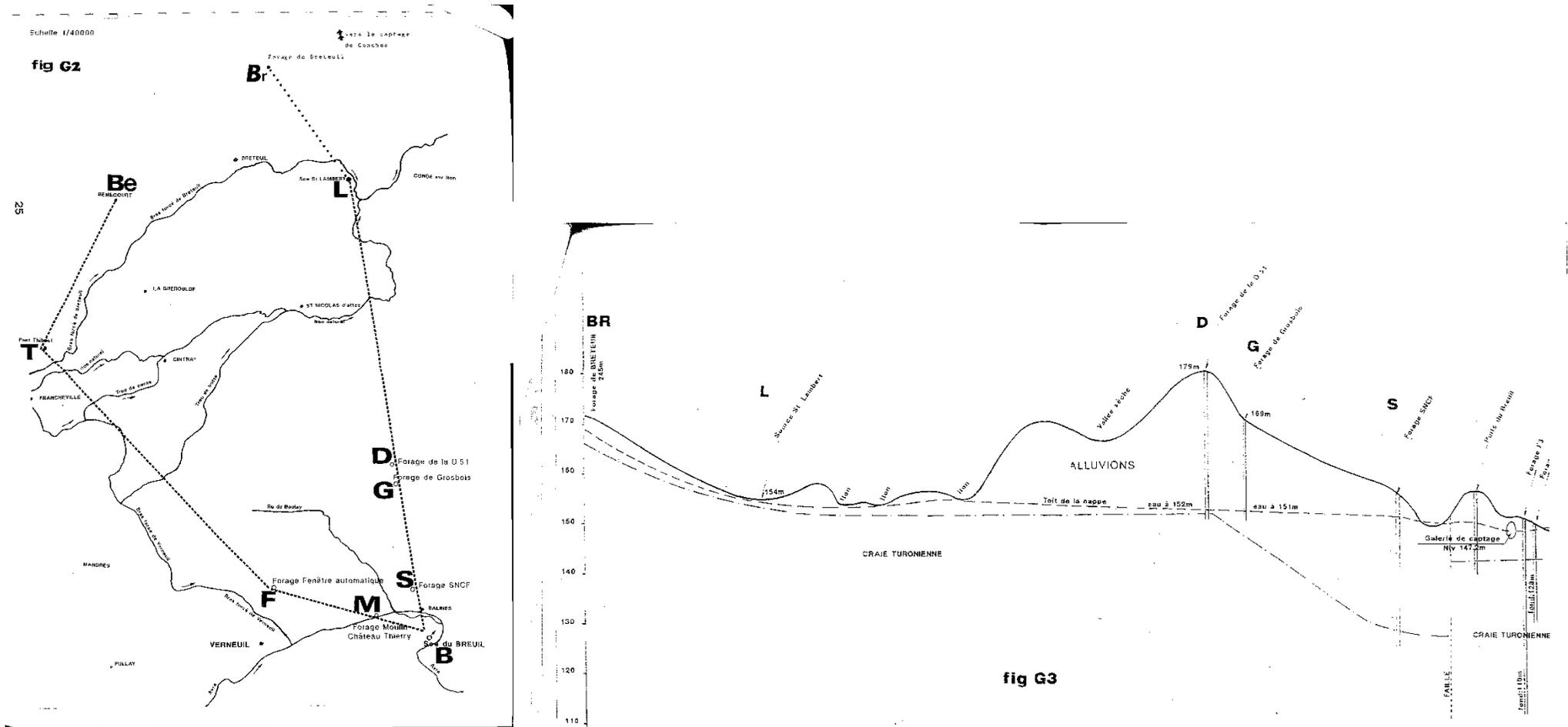


Illustration 6 : Coupe géologique de Breteuil au Breuil passant par les points Br, L D, G, S, C, B (figure de droite) et position de ces points sur la carte (figure de gauche) - G. Souchet (1994) (le niveau piézométrique de la nappe figure en tireté simple)



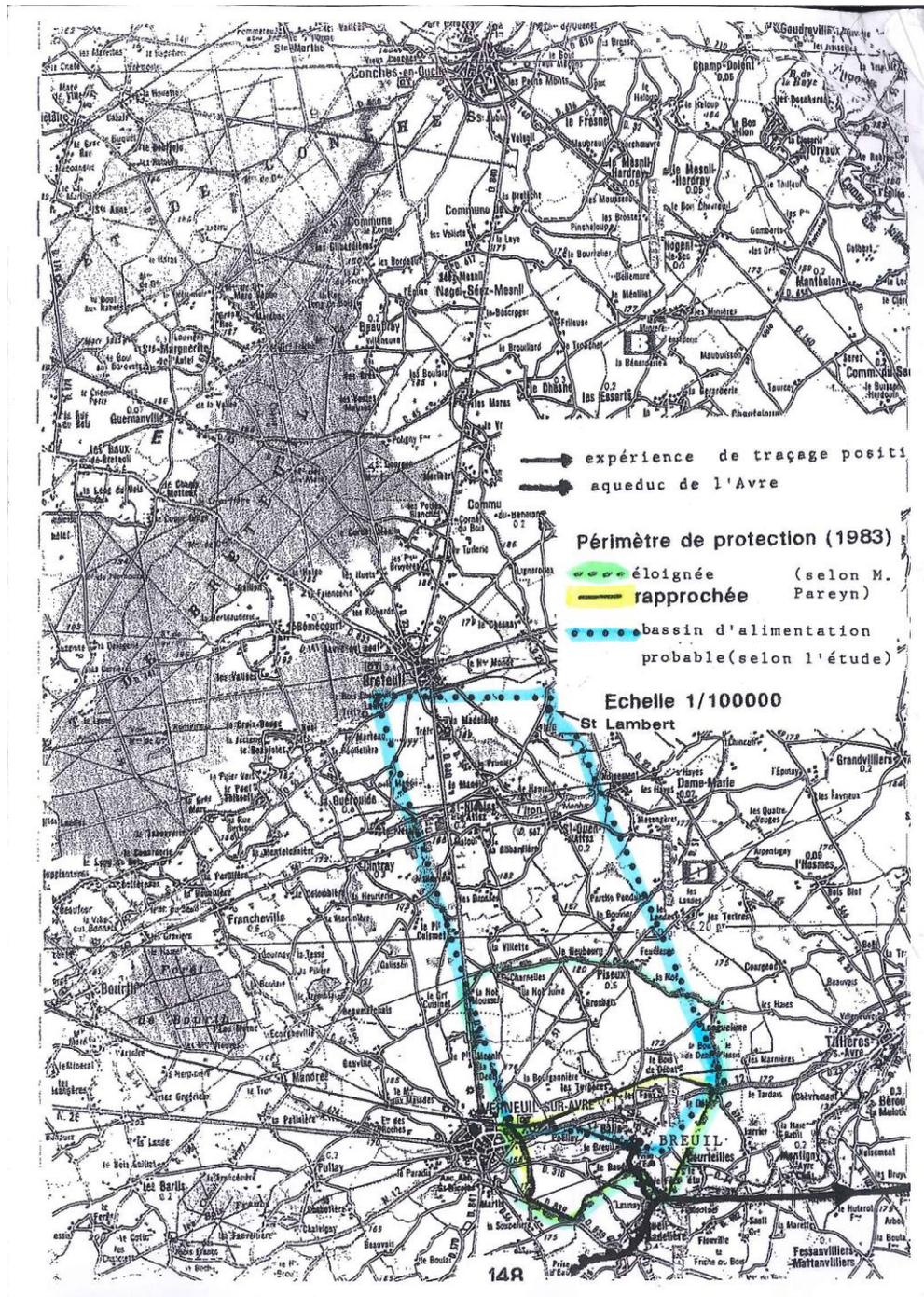


Illustration 7 : Bassin d'alimentation probable de la Source du Breuil (périmètre bleu) selon G. Souchet (1994)



#### 4.2. OBJECTIF DES INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Dans le cadre de la présente étude, à défaut de pouvoir réaliser une carte piézométrique fine en basse eaux, le BRGM a décidé de mettre en place un suivi piézométrique restreint visant à vérifier au mieux les hypothèses énoncées ci-dessus, pour les besoins de la modélisation. Il a ainsi réalisé des reconnaissances sur le terrain en janvier et février 2013 pour identifier des puits et forages existant dans ce secteur, qui pourraient faire l'objet d'un suivi en continu des niveaux de nappe.

A l'issue de ces reconnaissances et des démarches administratives de demande d'autorisation auprès des propriétaires, un dizaine de piézomètres répartis sur deux lignes ont été équipés de matériel de suivi des niveaux de nappe. Ces deux lignes de piézomètres se situent entre l'Avre et l'Iton sur des axes perpendiculaires aux deux cours d'eau (cf. Illustration 8).

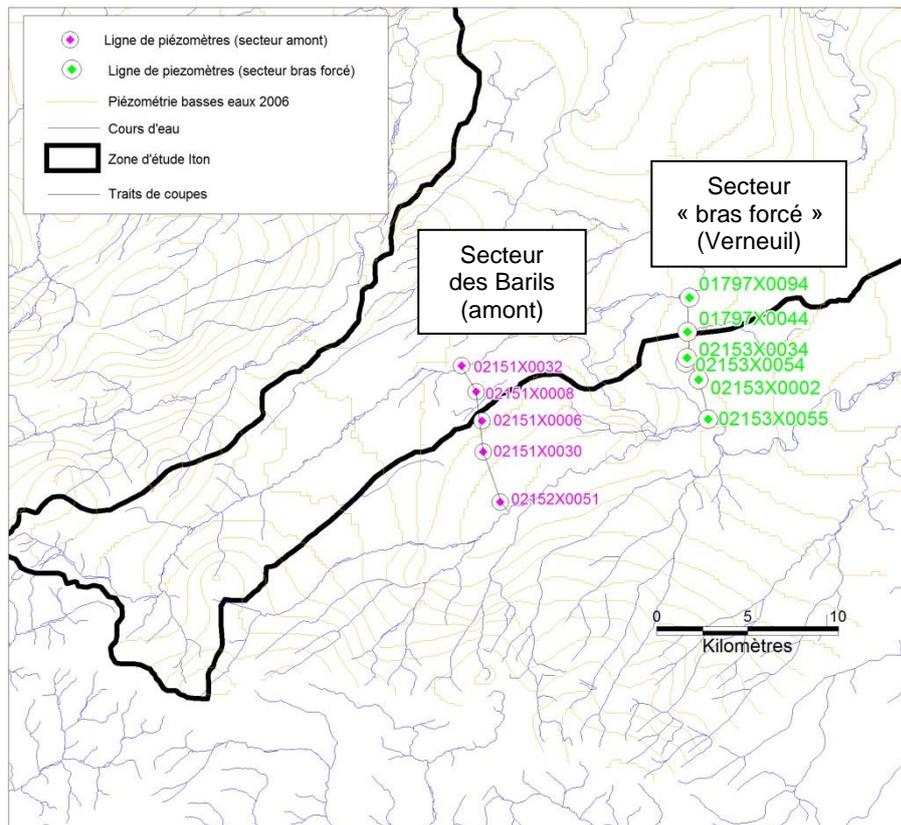


Illustration 8 : Piézomètres faisant l'objet d'un suivi depuis septembre 2013 pour étudier la pérennité de la crête piézométrique séparant les Bassins de l'Iton et de l'Avre

L'objectif de l'équipement de ces 10 piézomètres est de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'un effacement de la crête piézométrique en période de basses eaux.

### 4.3. RESULTATS

Le suivi piézométrique a débuté en avril 2013 sur la ligne « amont » et en septembre 2013 sur la ligne « bras forcé » (la situation de ces 2 lignes de piézomètres est présentée à l'illustration 8).

Ces piézomètres ainsi que les cours d'eau ont fait l'objet d'un nivellement au GPS différentiel. Les précisions des nivellements s'échelonnent de 1 à 50 cm.

Des coupes topographiques et piézométriques ont été réalisées à plusieurs dates en périodes de basses et hautes eaux saisonnières et sont présentées à l'illustration 9 et illustration 10.

Sur la période de suivi (mars 2013 à avril 2014), la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans le secteur des Barils semble bien marquée (illustration 9).

En revanche, dans le secteur « bras forcé » (illustration 9), la crête piézométrique est présente au niveau de Piseux, mais semble peu marquée. Le niveau piézométrique le plus haut mesuré (au niveau de Piseux) ne se situait que 2,14 m au-dessus de l'Iton le 11/12/2013. Cette hauteur n'est plus que de 0,88 m au-dessus de l'Iton le 06/05/2014. Or le cycle hydrologique qui a fait l'objet de ce suivi se situait dans un niveau de moyennes eaux pluriannuelles. Il est donc vraisemblable que la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton sur ce secteur disparaisse lors des périodes de basses eaux pluriannuelles, et parfois sans doute même en basses eaux annuelles. Il serait nécessaire de poursuivre à plus long terme le suivi des niveaux de nappes sur les piézomètres de Piseux pour pouvoir définitivement trancher sur ce point.

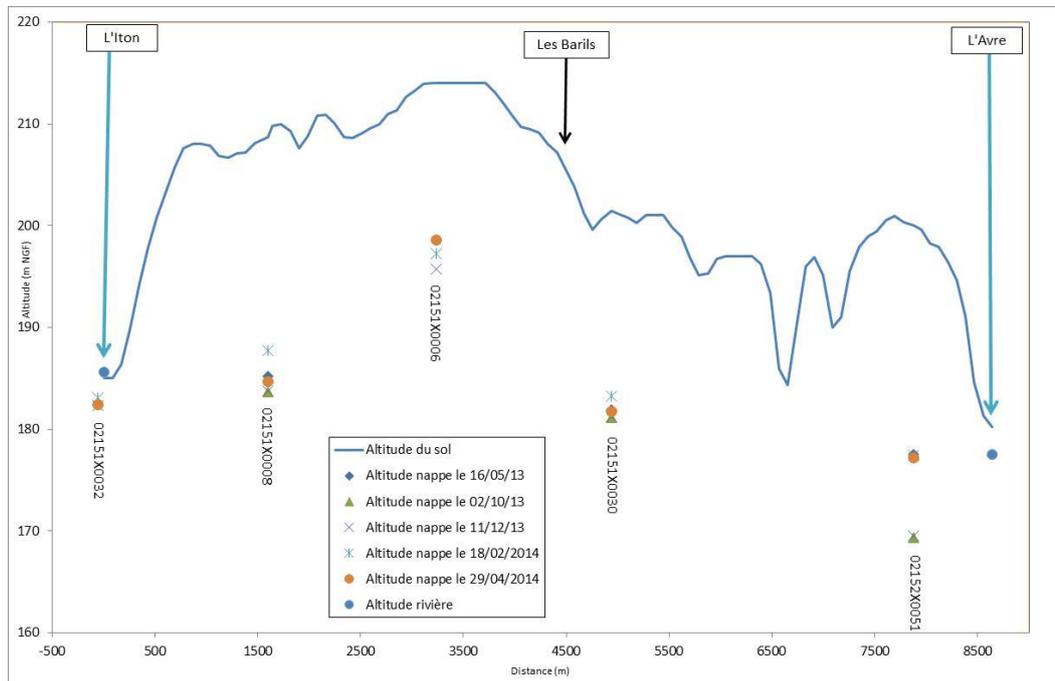


Illustration 9 : Coupe topographique et piézométrique réalisée entre l'Avre et l'Iton dans le secteur des Barils (secteur « amont »)

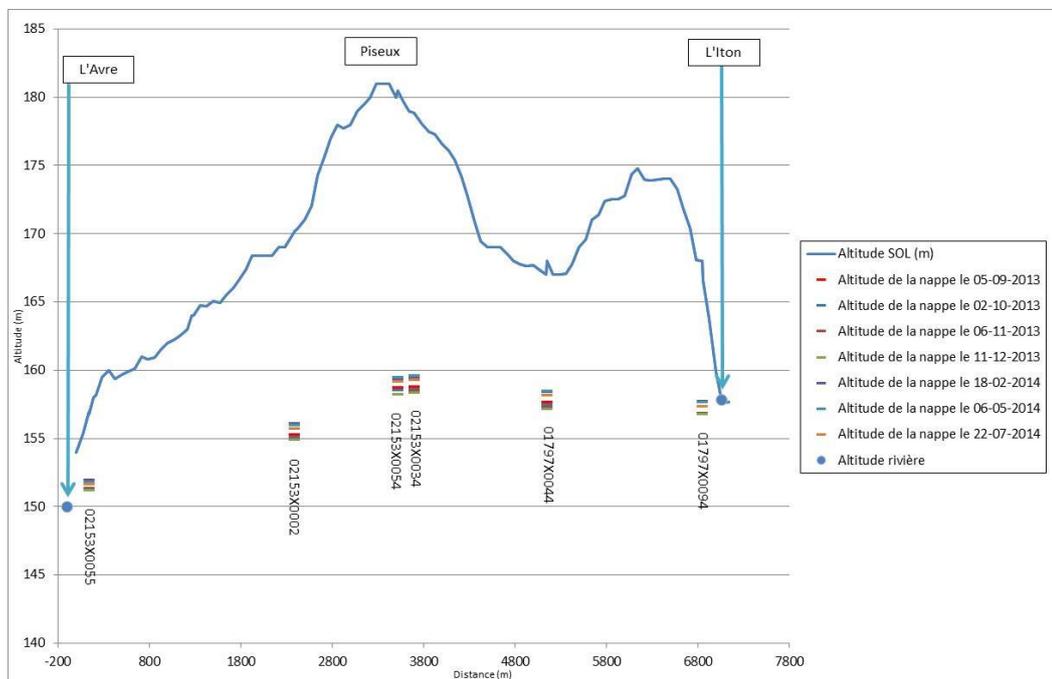


Illustration 10 : Coupe topographique et piézométrique réalisée entre l'Avre et l'Iton dans le secteur de Verneuil sur avre (secteur « bras forcé »)





forage de calage recensé dans la banque de données du sous-sol (BSS) est situé sur le tracé de ce profil ; la phase 1 a permis de déterminer la méthode géophysique la plus adaptée et retenue pour la poursuite de la campagne en phase 2 ;

- Phase 2 – Réalisation de profils électriques distribués de la façon suivante :
  - 1 profil (profil B) parallèle au profil A mais plus long afin de recouper le faisceau de 3 failles NW-SE. Il visait à obtenir la direction exacte de la faille principale et de confirmer la présence des 2 autres ;
  - 1 profil (profil C) perpendiculaire aux précédents pour reconnaître la faille supposée de direction SW-NE qui passerait dans la vallée du ruisseau Buternay ;
  - 1 profil (profil D) perpendiculaire aux profils A et B pour reconnaître la faille supposée de direction W-E qui passerait dans l'Avre au niveau de Verneuil ;
  - 1 profil (profil E) parallèle aux profils A et B, réalisé plus au nord en direction de Verneuil afin de vérifier si les failles mises en évidence pourraient être la continuité de la faille reconnue à Breteuil sur Iton ;
  - enfin 1 profil F réalisé dans le prolongement du profil A, afin de mieux caractériser une faille présente en fin de profil A.

### **5.3. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES**

#### **5.3.1. Personnel et calendrier**

Les acquisitions sur le terrain par des géophysiciens de l'unité DRP/RAI du BRGM et se sont déroulées sur 3 semaines différentes :

- du 19 au 20 février 2013 : réalisation du profil A ;
- du 25 au 29 mars 2013 : réalisation des profils B, C et E ;
- du 8 au 9 avril 2013 : réalisation des profils D et F.

Les actions de permittage (communication auprès de la population, autorisations d'accès sur les propriétés privées) ont été gérées par M. Vallon (garde rivière du SIVA).

#### **5.3.2. Matériel**

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 m sur 950 m. L'énergie provenait d'une batterie externe. L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi, afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m. Le matériel utilisé comprend :

- 1 Syscal Pro (convertisseur interne DC/DC de 250 W) ;
- 12 flûtes de 8 traces ;
- 96 électrodes ;

- 96 cordons ;
- 3 massettes ;
- 4 claies de portages ;
- 2 batteries de voiture 70 Ah ;
- 10 connecteurs de flûtes ;
- câbles divers ;
- 1 GPS différentiel Trimble GEOXH6000 ;
- 2 véhicules.

### 5.3.3. Travaux réalisés

Seize panneaux électriques (longueur unitaire 870 à 950 m) répartis sur 6 profils d'une longueur variant entre 870 et 1 590 m ont été réalisés (Illustration 13) en configuration dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Le linéaire total est de 8 490 m.

Le positionnement (X, Y) et l'altimétrie (Z) des panneaux électriques ont été effectués avec un GPS différentiel (GEOXH6000). La précision en X, Y et Z est de l'ordre de quelques décimètres.

Les caractéristiques des différents panneaux électriques sont données dans l'illustration 12.

Profil	Date d'acquisition	Longueur (m)	Nombre mesures conservées		Profondeur investigation (m)	Traitement	%RMS DD inversion standard	Résistances de prise (kohm)
			DD	WS	DDWS			
VSA_A	19 et 20/02/2013	1430	3836	3566	150/170	X2IPI	5.7	0.5 à 1.5
VSA_B	25 et 26/03/2013	1590	3980	3513	110/150	X2IPI	5.6	0.5 à 1.5
VSA_C	27/03/2013	1590	3133	2940	110/140	X2IPI	4.3	0.5 à 2.5
VSA_D	08 et 09/04/2013	1430	3356	2755	110/140	X2IPI	4.3	0.5 à 2.5
VSA_E	28 et 29/03/2013	1590	4040	3484	110/140	X2IPI	7	0.5 à 2.5
VSA_F	09/04/2013	860	1631	1474	110/130	X2IPI	4.8	0.5 à 2.5

Illustration 12 : Caractéristiques des panneaux électriques

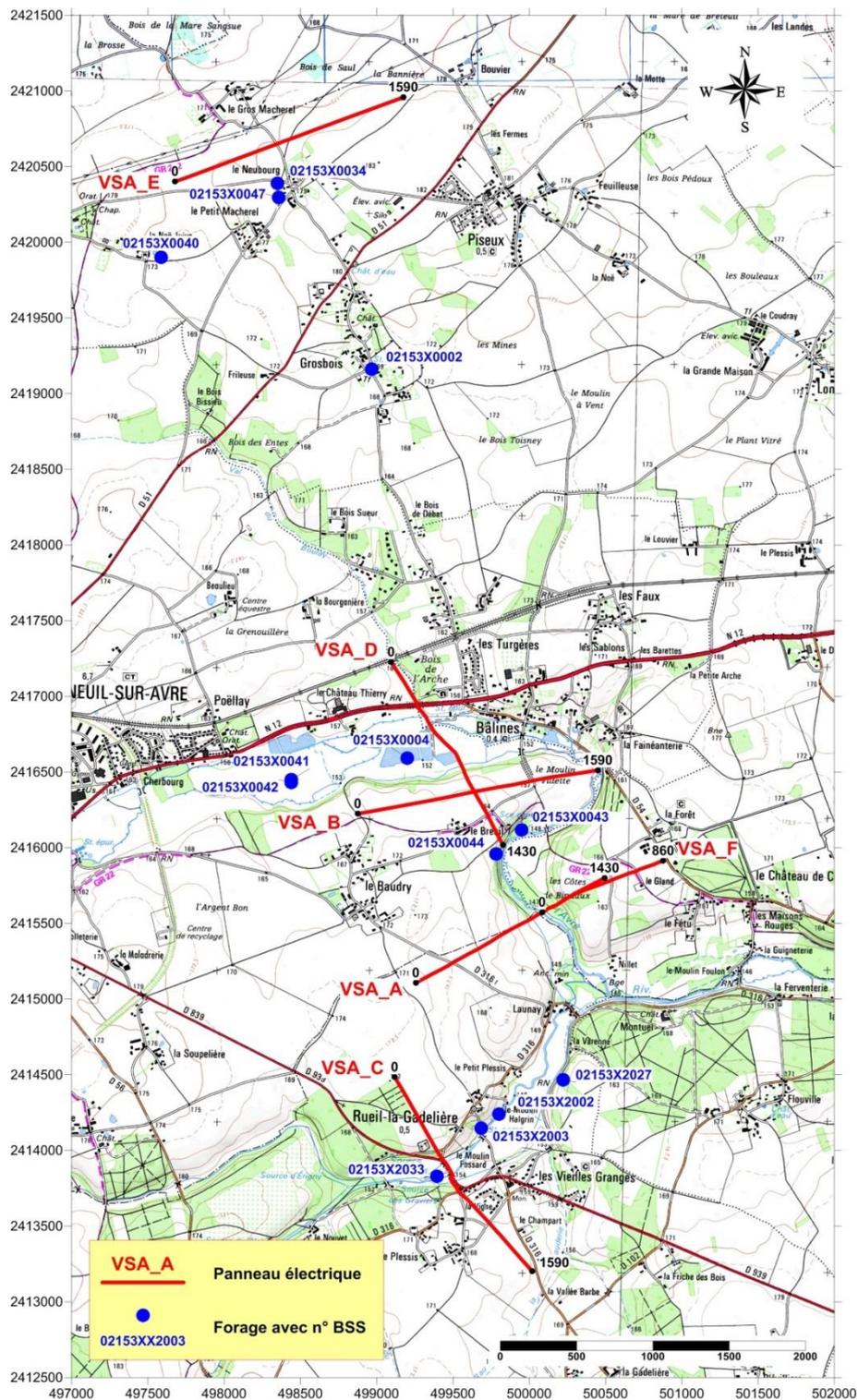


Illustration 13 : Carte de localisation des différents profils géophysiques réalisés

#### 5.3.4. Configuration d'acquisition des panneaux électriques

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface de manière à obtenir les informations recherchées. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en temps d'acquisition. La mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet, dans un contexte géologique complexe, de mieux appréhender la géométrie des différentes formations en présence.

Durant cette prospection, deux configurations d'acquisition ont été mises en œuvre lors de la réalisation des panneaux électriques : un dispositif dipôle-dipôle pour la résolution des terrains de surface ainsi qu'un dispositif Wenner-Schlumberger pour la profondeur.

**Le dispositif dipôle-dipôle** possède une très bonne résolution des terrains de sub-surface et donne une bonne caractérisation des discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation est inférieure à celle d'un dispositif Wenner-Schlumberger.

**Le dispositif Wenner-Schlumberger** est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 150m pour un dispositif de 950 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

Les caractéristiques concernant le traitement et l'inversion des différents panneaux électriques sont données dans le tableau 1.

Les principes de la méthode géophysique des panneaux électriques sont présentés en annexe 6.

#### 5.3.5. Traitement et inversion

Après filtrage des données de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité ( $Q < 5 \%$ ), de courant émis ( $I > 100 \text{ mA}$ ) ou de potentiel mesuré ( $V > 0,3 \text{ mV}$ ), celles-ci sont ensuite traitées avec le logiciel X2IPI (Bobachev Alexey, Moscow University) pour corriger les artéfacts dus aux à-coups de prise puis inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke & Barker, 1996). Les profils de topographie sont inclus lors des inversions de chaque panneau électrique.

La section de résistivité « vraie » (3<sup>e</sup> image (en bas) des figures présentées en annexe 1), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation géologique. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour différentes configurations d'acquisition.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion ont été choisis (annexe 6) de manière à optimiser la réponse du modèle.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements...).

### **5.3.6. Présentation des coupes de résistivité inversée**

Les résultats des inversions des données de résistivité sont présentés en Annexe 5.

## **5.4. RESULTATS**

### **5.4.1. Apport des informations géologiques disponibles sur le secteur**

Les données géologiques prises en compte pour l'interprétation des résultats sont :

- les forages recensés en BSS à proximité des coupes (aucun sondage de calage n'a été réalisé dans le cadre du projet) ;
- la synthèse stratigraphique des formations rencontrées dans le bassin de l'Avre ;
- une diagraphie gamma naturel réalisée dans le forage 02144X0051.

### **5.4.2. Interprétation des données géophysiques en termes de géologie et d'hydrogéologie**

La confrontation d'une part du schéma géo-électrique construit à partir des coupes de résistivité inversée et d'autre part des logs géologiques des forages ainsi que de la connaissance globale de la géologie du secteur, nous amène à l'interprétation suivante, de haut en bas (les coupes géoélectriques des 6 profils sont présentées en Annexe 5) :

- **Un premier terrain résistant noté Fz** dont la résistivité est supérieure à 100 ohm.m. Il a été mis en évidence dans la vallée de l'Avre (profils A, B et D) où son épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres. Il correspond à des alluvions grossières ennoyées. Dans la vallée du Buternay (profil C) cet horizon géo-électrique n'a pas été mis en évidence ce qui est cohérent avec les résultats des différents sondages réalisés dans le fond de cette vallée (forage 02153X2003 : 3 m d'alluvions) ;

- **Un deuxième terrain conducteur C2** dont la résistivité est comprise entre 30 et 100 ohm.m. Il est présent sur l'ensemble du secteur mais de façon relativement discontinue avec une épaisseur qui varie de 0 à 10 m au maximum. Cet horizon géo-électrique est soit affleurant, soit sous couverture alluvionnaire. Il serait attribué soit à des limons ou loëss en contexte de plateau, soit à des alluvions sablo-argileuses en fond de vallée ;
- **Un troisième terrain résistant R1** dont la résistivité est comprise entre 80 et 300 ohm.m. Il est présent sur l'ensemble du secteur même en fond de vallée et son épaisseur, qui est relativement constante, s'établit aux environs d'une quinzaine de mètres. Il peut être parfois en position sub-affleurante (extrémité SE du profil C et extrémité E du profil E). Cet horizon géo-électrique serait attribué à la frange dénoyée des argiles à silex. Sur le profil E, le niveau statique mesuré dans les forages 02153X0040 et 02153X0047 est en parfaite corrélation avec la base de cet horizon R1 ;
- **Un quatrième terrain conducteur C1** dont la résistivité est comprise entre 25 et 80 ohm.m. L'épaisseur de cet horizon géoélectrique semble être un peu moins importante que celle de l'horizon sus-jacent R1 et serait comprise entre 10 et 15 m. Il correspondrait à la zone saturée des argiles à silex. Les forages projetés sur les profils C et E offrent un excellent calage pour le toit de cet horizon (niveau statique) et pour la base (contact entre les argiles à silex et la craie du Turonien). L'épaisseur de la formation des argiles à silex dans son intégralité, c'est-à-dire la zone non saturée plus la zone saturée est en moyenne de 25 à 30 m. Cette formation est présente aussi bien en contexte de plateau qu'en contexte de fond de vallée où son épaisseur reste importante (environ 25 m dans le fond de la vallée du Buternay au niveau des forages 02153X2002 et 2003) ;
- **Un cinquième terrain résistant R0** dont la résistivité moyenne est de l'ordre de 250 ohm.m. Son épaisseur, qui est relativement constante sur l'ensemble du secteur d'étude, s'établit aux environs de 30 à 40m. Les forages projetés sur les profils C et E offrent un excellent calage pour le toit et le mur de cet horizon et permettent d'attribuer celui-ci à la craie à silex du Turonien. Différentes synthèses stratigraphiques des formations rencontrées dans le bassin de l'Avre confirment l'épaisseur moyenne, environ 35m, du Turonien. En aval du faisceau de failles F1, c'est-à-dire à l'Est, l'épaisseur du Turonien serait également de l'ordre de 35 m. La résistivité de cette formation est relativement constante sur l'ensemble du secteur d'étude sauf au niveau des failles où l'on enregistre une baisse de la résistivité due à la zone de fracturation/altération associée à ces accidents. Cette constance impliquerait donc l'absence de variation lithologique au sein du Turonien.
- **Un substratum géophysique conducteur C0**, dont la résistivité est de l'ordre d'une vingtaine d'ohm.m. L'épaisseur de cet horizon géoélectrique n'a pas été appréhendé du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. Elle serait néanmoins supérieure à 70m. Ce substratum correspondrait à la craie marneuse

du Cénomaniens. Le contraste de résistivité entre la craie du Turonien (250 ohm.m) et la craie du Cénomaniens (20 ohm.m) s'expliquerait par la différence de la fraction argileuse entre ces deux formations. Comme le laisse supposer les descriptions lithologiques des forages, la craie du Cénomaniens contiendrait un fort pourcentage de glauconie (argile). Cette différence d'argilosité est confirmée par une diagraphie gamma naturel réalisée dans le forage 02144X0051.

### 5.4.3. Schéma structural du secteur d'étude

L'interprétation des 6 coupes géo-électriques (coupes présentées en Annexe 5) a mis en évidence des discontinuités verticales qui ont été assimilées à des failles. Sur chacun des profils la localisation et la caractérisation de ces failles est la suivante :

#### **Profils VSA-A et VSA-F**

- **Le faisceau de failles F1** est constitué de 4 failles notées F1a, F1b, F1c et F1d. Ces failles sont à priori sub-verticales sauf F1b qui pourrait avoir un pendage vers l'Est. Au niveau du profil A, le jeu de ces failles n'est pas clairement mis en évidence car elles sont situées à l'extrémité de la coupe (mauvaise résolution, effets de bord). Par contre, les rejets de ces failles sont bien caractérisés sur le profil F qui vient en recouvrement du profil A. Le rejet vertical engendré par le faisceau de failles F1 est de 17 m, le compartiment Est étant surélevé. Ce rejet a été calculé en faisant la différence entre la cote NGF du toit du Turonien (111 m) juste à l'Ouest de F1b et la cote de cette même interface (128 m) juste à l'E de F1d.  
Ce faisceau de failles F1 et plus particulièrement F1a est probablement associé à une zone de fracturation et d'argilisation marquée par la présence d'une anomalie conductrice sub-verticale approximativement centrée sur cette faille F1a. Cette zone d'argilisation conductrice constituerait un barrage à l'écoulement des eaux de l'aquifère du Turonien et expliquerait la présence des sources en amont de cette barrière étanche.
- **Les failles F2 et F3** sont des failles mineures dont les rejets verticaux sont de faible amplitude (quelques mètres). Elles seraient à priori sub-verticales.
- **La faille F4** semble avoir un rôle plus important mais comme elle a été mise en évidence à l'extrémité du profil, il est délicat d'interpréter son fonctionnement. Sur cette coupe géo-électrique (profil A + profil F) le pendage apparent des formations est vers l'Est (4.5% entre F2 et F1) dans la zone située en amont du faisceau F1 et vers l'Ouest dans la zone aval (0.6% entre F1 et F4).

#### **Profil VSA-B**

- Le profil B intersecterait l'extension vers le Nord du faisceau de failles F1. Cette hypothèse s'appuie sur une similitude de la signature géo-électrique au niveau des profils A et B et sur la présence supposée (études antérieures) d'un accident majeur de direction approximativement Nord-Sud. Ce faisceau de failles est

également constitué de 4 failles notées F1a, F1b, F1c et F1d dont 3 seraient sub-verticales et une (F1b) avec un pendage vers l'Est.

Comme au niveau du profil A, la faille F1a est associée à une anomalie conductrice sub-verticale qui marquerait la présence d'une zone argilisée constituant une barrière étanche.

Le fonctionnement de ces failles n'a pas été clairement mis en évidence car celles-ci sont situées à l'extrémité de la coupe (faible résolution, effets de bord).

- **Les failles F2 et F3** sont supposées être le prolongement vers le Nord des failles éponymes du profil A. Cette hypothèse est beaucoup moins étayée que pour le faisceau de failles F1. Ces deux failles qui sont à priori sub-verticales semblent avoir un rôle mineur (rejets verticaux de très faibles amplitudes, pas de signature géo-électrique particulière).

Le pendage apparent des formations en amont de F1 est de l'ordre de 0.9% vers l'Est.

### **Profil VSA-C**

- **Le faisceau de failles F6** est constitué de 4 failles notées F6a, F6b, F6c et F6d. Ces failles sont localisées dans le fond de la vallée du Buternay et sur ces flancs Sud et Nord. Elles sont sub-verticales à légèrement inclinées vers le Nord sauf F6d qui pourrait avoir un pendage Sud. Globalement ce faisceau de failles ne présente pas de rejet vertical, le toit du Turonien est approximativement à la même cote NGF dans le compartiment Sud-Est et dans le compartiment Nord-Ouest. Dans le détail, au sein du faisceau, le bloc délimité par les failles F6c et F6a semble être surélevé de quelques mètres. La signature géo-électrique du faisceau F6 est relativement identique à celle du faisceau F1 à savoir :
  - présence de 4 failles ;
  - largeur du faisceau environ 250m ;
  - 3 failles sub-verticales et une quatrième inclinée vers le centre du faisceau ;
  - Une faille principale F6a associée à une anomalie conductrice qui marquerait la présence d'une zone argilisée. Cette structure constituerait une barrière étanche qui ferait blocage à l'écoulement des eaux du Turonien et provoquerait des résurgences.
- **La faille F7**, mise en évidence à l'extrémité Sud-Est de la coupe géo-électrique, est très mal caractérisée (mauvaise résolution, effets de bord).

Au niveau du profil C, le pendage apparent des formations serait de 0.8% vers le SE.

### **Profil VSA-D**

**La faille F5** mise en évidence sur ce profil est en parfaite corrélation avec l'escarpement qui marque le flanc sud de la vallée de l'Avre. Elle serait sub-verticale et le rejet qu'elle engendre serait d'une dizaine de mètres, le compartiment sud étant

surélevé. Contrairement au faisceau de failles F1 et F6, cette faille n'est pas associée à une anomalie conductrice reflétant la présence d'une zone d'argilisation. Elle aurait donc un caractère plutôt drainant que colmatant.

Le pendage apparent des formations serait de l'ordre de 1.8% vers le Sud-Est dans le compartiment situé au Nord-Ouest de F5 et de 2.4% vers le Nord-Ouest dans le compartiment situé au Sud-Est de F5.

### **Profil VSA-E**

- Le faisceau de failles mis en évidence à l'extrémité du profil E a été attribué à l'extension vers le Nord du faisceau F1 intersecté par les profils A et B. Cette hypothèse repose sur les critères suivants :
  - Une signature géo-électrique relativement identique avec 4 failles dont 3 avec un léger pendage vers l'Ouest et une avec un pendage vers l'Est et une largeur de faisceau de l'ordre de 250 m ;
  - Une direction structurale (N165°) supposée d'après les études antérieures.

Le rejet vertical engendré par ce faisceau de failles n'a pas été clairement mis en évidence mais il ne semble pas être significatif.

Au niveau de ce profil, le fonctionnement du faisceau F1 serait différent de celui qui a été mis en évidence au niveau des profils A et B. Aucune des failles constituant ce faisceau n'est associée à une anomalie conductrice marquant la présence d'une zone d'argilisation. On peut donc supposer que cette structure aurait plutôt un caractère drainant.

- Les failles F2 et F3 ont également été attribuées aux extensions vers le Nord des failles éponymes mises en évidence au niveau des profils A et B et ce pour les mêmes raisons. Ces 2 failles semblent avoir un rôle mineur et ne présentent pas de rejets verticaux significatifs.

Au niveau de ce profil, les formations géologiques en présence sont sub-horizontales.

#### **5.4.4. Synthèse de l'interprétation structurale**

La spatialisation de l'information structurale émanant de l'interprétation des 6 coupes géo-électriques a permis d'élaborer un schéma structural de la zone d'étude. Compte tenu de la superficie du secteur et de la faible densité des profils électriques, la construction de ce schéma n'est pas univoque. Cependant, son élaboration prend en compte d'autres critères qui sont par ordre de priorité les suivants :

- Les alignements de sources ou résurgences ;
- Les directions structurales régionales ;
- La géomorphologie.

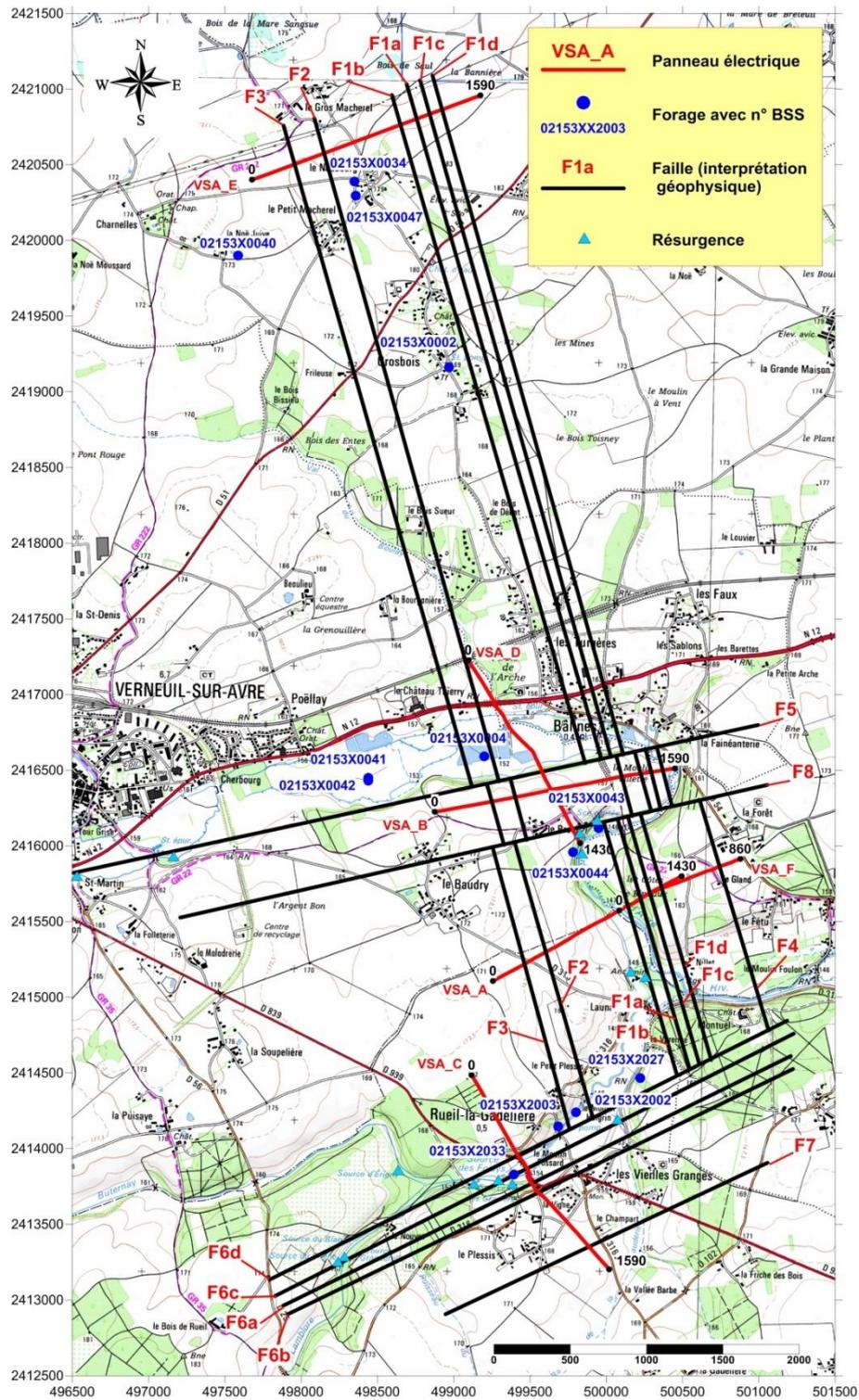


Illustration 14 : Carte structurale supposée à l'issue des investigations géophysiques

Cette carte structurale (Illustration 14) met donc en évidence :

- Un faisceau de failles F1 dont la direction serait N165° (direction de failles reconnues dans la région de Breteuil-sur-Iton et qui se prolongeraient vers Verneuil-sur-Avre d'après des études antérieures). Cette structure constituée de 4 failles et possédant une largeur d'environ 250m, aurait un caractère colmatant (présence d'une barrière argileuse) dans la partie sud du secteur qui expliquerait la présence des résurgences dans la vallée de l'Avre et un caractère plutôt drainant (pas de zone argilisée) à l'extrémité nord du secteur.

Ce faisceau de failles serait affecté par un décrochement horizontal de l'ordre de 200 m vers l'Est dans le compartiment délimité par les failles F5 et F8.

- Un faisceau de failles F6 de direction N65° (direction des failles de Merlerault et de Courtomer dans le bassin de l'Avre). Ce faisceau possède les mêmes caractéristiques que F1 à savoir :
  - Constitué de 4 failles ;
  - Largeur 250m ;
  - Caractère colmatant ;
  - Corrélié avec les résurgences de la vallée du Buternay et de la Lamblore.

Aucun rejet vertical n'a été mis en évidence entre le compartiment Nord et le compartiment Sud.

- Deux failles F5 et F8 de direction N75° appartenant donc à la même famille que le faisceau de failles F6. Elles délimiteraient un compartiment relativement étroit (400m) et décrocheraient le faisceau F1 vers l'Est.

La localisation de la faille F5 repose sur les critères suivants :

- Géophysique : signature géo-électrique au niveau du profil D
- Géomorphologique : escarpement constituant le flanc Sud de la vallée de l'Avre
- Hydrogéologique : présence de résurgences sur le tracé de la faille au Sud de Verneuil.

Par contre, le tracé de la faille F8 ne repose que sur des indices géomorphologiques et sur la présence de résurgences (sources du Breuil). Le profil D ne s'étend pas suffisamment vers le Sud pour caractériser cette faille.

Le compartiment F5-F8 serait en position surélevé (horst) par rapport aux compartiments Nord et Sud.

- Deux failles F2 et F3 de direction N165° c'est-à-dire appartenant à la même famille que le faisceau F1. Ces failles semblent avoir un rôle mineur.
- Les failles F4 et F7 qui n'ont été intersectées que par un seul profil géophysique, ont été reportées sur cette carte à titre indicatif. Aucun élément ne permet de conforter leur orientation.

Le pendage des formations géologiques serait globalement vers le Sud-Est dans la partie du secteur qui est située au Sud de la route N12 alors qu'au Nord (profil E) ces formations seraient plutôt horizontales.



## 6. Construction du modèle géologique 3D

Dans le cadre de la phase 4 de ce projet, une modélisation géologique du bassin de l'Avre a été réalisée. L'objectif du travail est de construire un modèle géologique numérique 3D qui fournira les éléments de géométrie des réservoirs qui seront intégrées dans le modèle hydrogéologique.

Le logiciel GDM-Multilayer 2014 (BRGM) est utilisé pour la construction du modèle géologique en trois dimensions. Il permet de créer un modèle dit multicouche fournissant une information sur la géométrie des structures constituant le bassin (altitudes des différentes surfaces modélisées et épaisseur des couches). Ces données seront par la suite les données d'entrée aux modèles de simulation des écoulements de la nappe.

Le modèle est construit à partir de (1) la définition d'unités géologiques qui se succèdent chronologiquement et se déposent les unes sur les autres selon des surfaces de dépôts sédimentaires ou d'érosion (la pile litho stratigraphique) ; (2) la définition d'un réseau de failles verticales ; (3) de l'interpolation des données géologiques et géophysiques compilées et hiérarchisées au préalable.

Le travail de modélisation a consisté (i) à compiler, préparer, et mettre en cohérence les données nécessaires à la construction du modèle ; (ii) à interpoler ces données ; (iii) à combiner les surfaces modélisées. Les différentes étapes de construction du modèle géologique sont décrites dans la suite de ce chapitre.

Les résultats de la modélisation sont fournis sous forme de cartes des altitudes des toits ou murs des couches, des cartes d'épaisseurs et des coupes géologiques sélectionnées. Un pdf 3D est aussi produit permettant de visualiser le modèle en 3D. Les exports du modèle sont des grilles des altitudes des toits et murs des couches modélisées ainsi que des grilles des épaisseurs de chaque couche. Ces grilles seront ensuite importées dans le logiciel de simulation hydrodynamique *Marthe* pour la simulation des écoulements.

### 6.1. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

A partir de la bibliographie et des informations fournies par l'étude fine des données de forage, les lithologies rencontrées dans le bassin versant de l'étude peuvent être décrites comme suit, avec de bas en haut (de la formation la plus ancienne à la plus récente) :

#### 6.1.1. Jurassique

Les formations du Jurassique marquent la base du modèle. Elles ne sont rencontrées à l'affleurement qu'au sud, en dehors des limites de la zone d'étude, et à faible profondeur en forage à l'extrémité sud-ouest de la zone étudiée. Les formations concernées ici sont essentiellement les formations calcaires de l'Oxfordien.

Les formations jurassiques s'enfoncent vers le centre du bassin de Paris.

		Etage géologique	Age (Ma)	Formation
<b>Formations superficielles</b>		Quaternaire	2,5	Loess / Colluvions / Alluvions
		Tertiaire / Quaternaire	10	Formation à silex
<b>Sénonien</b>		Campanien	83	Craie
		Santonien	86	
		Coniacien	89	
<b>Turonien</b>		Turonien moyen et supérieur	92	
		Turonien inférieur	93,5	
<b>Cénomaniens</b>		Cénomaniens moyen et supérieur	97	
		Cénomaniens inférieur	100	Craie
			102	Glauconie de base
<b>Crétacé inférieur</b>		Albien	112	Argiles du Gault
		Aptien	125	Sables et argiles
<b>Jurassique</b>			>145	Calcaires, sables et marnes

Illustration 15 : Log schématique des formations rencontrées au droit de la zone d'étude

### 6.1.2. Crétacé inférieur

Les formations du Crétacé inférieur sont transgressives, vers le sud-ouest sur les formations jurassiques. Les séries du Crétacé ont été largement érodées. Ces formations constituent le mur de l'aquifère étudié car ont une forte dominante argileuse imperméable.

- **Les sables et argiles de l'Aptien**

Peu épaisse au Sud-Ouest, dans les zones proches de l'affleurement, cette formation peut être constituée de silt avec des intercalations d'argiles grises ou de sables gris-verts à intercalations argileuses ; on la distingue peu de la formation sus-jacente :

- **Formations argileuses de l'Albien**

Elle débute par des sables argileux gris-vert. L'Albien est toutefois marqué en majorité par la présence de la formation d'argiles du Gault ; argiles compactes, plastiques, gris foncés à noires, pouvant contenir des passées sableuses.

• **Glauconie de base**

Il s'agit d'une formation transgressive, qui marque la limite entre l'Albien et le Cénomanién (souvent datée de l'Albo-Cénomanién). Cette couche repère, qui marque la limite du Crétacé supérieur, est présente sur l'ensemble du territoire de l'étude. Il s'agit d'une formation souvent gris-verdâtre, souvent très plastique, à forte dominante argileuse et glauconieuse, plus ou moins sableuse, selon les terrains remaniés lors de la transgression.

**6.1.3. Crétacé supérieur**

• **Cénomanién inférieur**

La base du Cénomanién est marquée par des craies peu franches, tantôt marneuses, sableuses, grisâtres ou verdâtres. On peut trouver intercalés des bancs de sables ou de marnes glauconieuses. Les séries du Cénomanién inférieur sont relativement isopaques, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Du fait de l'hétérogénéité lithologique de cette formation et du faible taux de carbonates, les formations crayeuses du Cénomanién inférieure ont été différenciées dans le modèle géologique (CENI).

	Etage géologique	Age (Ma)	Formation	
Formations superficielles	Quaternaire	2,5	Loess / Colluvions / Alluvions	
	Tertiaire / Quaternaire	10	Formation à silex	
Sénonien	Campanien	83	Craie	
	Santonien	86		
	Coniacien	89		
Turonien	Turonien moyen et supérieur	92		
	Turonien inférieur	93,5		
Cénomanién	Cénomanién moyen et supérieur	97		(Sables du Perche)
	Cénomanién inférieur	100		Craie
		102		Glauconie de base
Crétacé inférieur	Albien	112		Argiles du Gault
	Aptien	125		Sables et argiles
Jurassique		>145	Calcaires, sables et marnes	

• **Sables du Perche**

Particularité du sud du bassin versant, on trouve la présence de sables dits du Perche. Sables assez grossiers à la base, puis généralement plus fins, avec alternance de lits plus grossiers sur sa partie supérieure. Il s'agit probablement d'un dépôt d'éléments détritiques issus de l'érosion de la bordure armoricaine, probablement alors en soulèvement. Leur extension vers le nord est très liée à la présence de la faille de Senonches, qui aura probablement généré un relief limitant d'une part les dépôts plus au nord, et protégeant ensuite cette formation de

l'érosion. On retrouve toutefois par endroits des formations sableuses au nord de la faille de Senonches qui ont pu être interprétées comme des Sables du Perche (cf. 6.2).

Les Sables du Perche constituent de fait une entité à part entière dans le modèle (PERC).

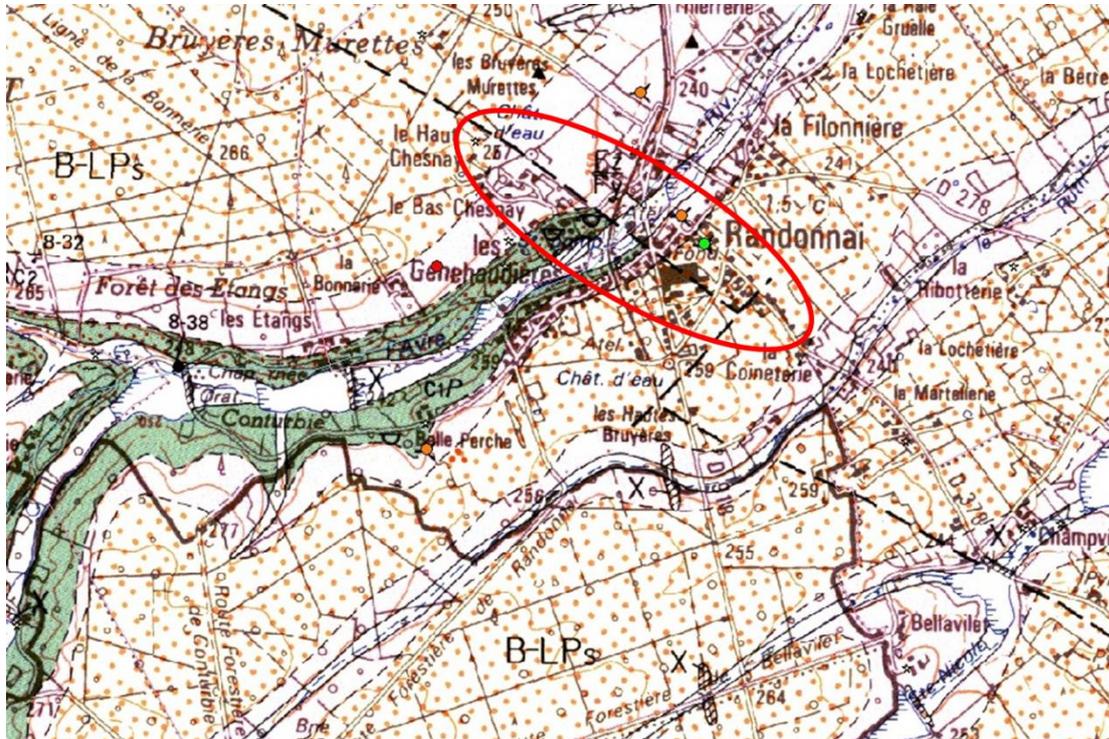


Illustration 16 : Délimitation nette de l'affleurement des sables du perche au niveau de la faille de Senonches

#### • Cénomaniens moyen et supérieur

Les parties supérieures du Cénomaniens inférieur, puis le Cénomaniens moyen et supérieur contiennent de plus en plus de carbonates, et peuvent être considérées comme relativement homogènes. C'est pourquoi elles ont été considérées comme une entité dans le modèle géologique (CENO).

La craie du Cénomaniens moyen, dite craie de Rouen est un calcaire tendre, pouvant contenir des couches glauconieuses, des niveaux de silex et des bancs durs (hard ground ; marquant le plus souvent des arrêts de sédimentation en milieu peu profond), qui vont marquer des niveaux repères. Le hard ground de Rouen (à la base de la craie de Rouen), notamment, marque le passage entre les craies hétérogènes de la base du Cénomaniens, et les craies plus carbonatées du Cénomaniens moyen et supérieur.

D'une manière générale, on considérera les craies du Cénomaniens moyen et supérieur comme des craies verdâtres ou grisâtres, parfois sableuses et noduleuses.

#### • Craies du Turonien

On distingue deux ensembles dans le Turonien :

Le Turonien inférieur est un niveau repère dans tous les forages qui le traversent. Il possède en effet des caractéristiques bien particulières : une craie marneuse (à *Inoceramus labiatus*) ; une

couleur blanche à blanche grisâtre, qui le distingue des craies du Cénomaniens sous-jacentes ; une quasi absence de silex ; un caractère isopaque, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur.

Le caractère relativement marneux de la craie du Turonien inférieur fait que dans le modèle géologique réalisé à des fins hydrogéologiques, ce niveau a été associé aux craies du Cénomaniens inférieur et moyen (CENO).

	Etage géologique	Age (Ma)	Formation	
Formations superficielles	Quaternaire	2,5	Loess / Colluvions / Alluvions	
	Tertiaire / Quaternaire	10	Formation à silex	
Sénonien	Campanien	83	Craie	
	Santonien	86		
	Coniacien	89		
Turonien	Turonien moyen et supérieur	92		
	Turonien inférieur	93,5		
Cénomaniens	Cénomaniens moyen et supérieur	97		(Sables du Perche)
	Cénomaniens inférieur	100		Craie
		102		
Crétacé inférieur	Albien	112		Glauconie de base
	Aptien	125		Argiles du Gault / Sables et argiles
Jurassique		>145	Calcaires, sables et marnes	

Les parties supérieures du Turonien (essentiellement Turonien moyen) se caractérisent par une craie plus sèche, blanche à silex (craie à *Terebratella bourgeoisii*), à plus forte porosité.

• **Craies du Sénonien (Coniacien, Santonien, Campanien)**

Il s'agit là aussi essentiellement de craies sèches, à très fort taux de carbonate de calcium, à silex. On y trouve une porosité importante et homogène. C'est pourquoi dans le modèle géologique, les craies du Sénonien ont été regroupées en une seule entité (SENO), comprenant aussi les craies du Turonien moyen, donc les caractéristiques sont assez similaires.

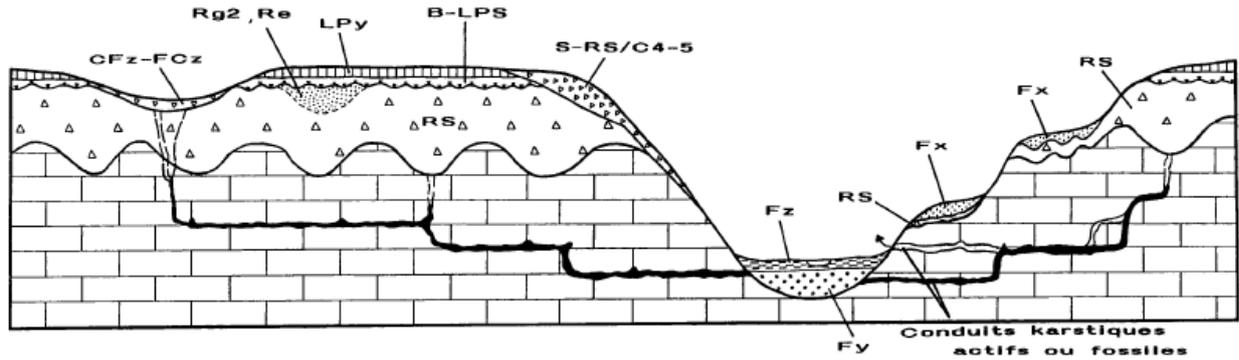
Leur épaisseur peut dépasser 100 m dans le NE de la zone d'étude.

	Etage géologique	Age (Ma)	Formation
Formations superficielles	Quaternaire	2,5	Loess / Colluvions/ Alluvions
	Tertiaire / Quaternaire	10	Formation à silex
Sénonien	Campanien	83	Craie
	Santonien	86	
	Coniacien	89	
Turonien	Turonien moyen et supérieur	92	
	Turonien inférieur	93,5	
Cénomanién	Cénomanién moyen et supérieur	97	
	Cénomanién inférieur	100	Craie
		102	Glauconie de base
Crétacé inférieur	Albien	112	Argiles du Gault
	Aptien	125	Sables et argiles
Jurassique		>145	Calcaires, sables et marnes

Parmi les particularités, on distinguera ponctuellement dans le Coniacien et dans le Santonien des craies parfois plus jaunâtres, parfois dolomitisées ou bréchifiées, pouvant être décrites sous forme de passées sableuses dans les forages qui les traversent.

#### 6.1.4. Formations superficielles

Les formations superficielles sont les formations les plus représentées à l'affleurement dans la zone d'étude. Elles recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux du secteur, les affleurements de craie n'étant localisés qu'au niveau des fortes pentes et des abrupts, situés sur les versants des vallées.



LP <sub>y</sub>	: Loess	S-RS/C <sub>4,5</sub>	: Formation à silex solifluée sur craie sénonienne
F <sub>z</sub>	: Alluvions fines holocènes	B-LPS	: Limon à silex
F <sub>y</sub>	: Alluvions grossières weichseliennes	RS	: Formation résiduelle à silex
F <sub>x</sub>	: Alluvions anciennes périglaciaires pléistocènes	R <sub>e</sub> ou R <sub>g2</sub>	: Sables cénozoïques en poches résiduelles
CF <sub>z</sub> -FC <sub>z</sub>	: Colluvions-alluvions des vallées sèches		

Illustration 17 : Répartition schématique des formations superficielles sur substratum crayeux de l'Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al. 1996)

#### • Les formations résiduelles à silex (RS) et les biefs et limons à silex (B-LPS)

Les formations résiduelles à silex ou résidus à silex (RS) recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux de la zone d'étude. Elles résultent de l'altération des différents niveaux crayeux du Crétacé supérieur et se sont formées après l'émersion fini-crétacée, au cours du Cénozoïque. Ce sont des formations globalement sub-autochtones, formées sur place aux dépens de substratum crayeux et sans l'intervention d'agents de transport. Ils sont parfois entrecoupés de poches de sables tertiaires. Ces sables tertiaires peuvent contaminer les RS (contamination postérieure aux dépôts des sables tertiaires) (Laignel, 1993).

Les RS de plateau sont constituées de silex emballés dans une matrice argileuse, pouvant être sablo-argileuse à proximité des poches de sables ou silto-argileuse au sommet des profils recouverts de limons lœssiques (LP). L'épaisseur varie de quelques mètres à quelques décamètres : la moyenne étant d'environ 15 m.

D'un point de vue hydrogéologique, cette formation peut être le siège d'une nappe de stagnation temporaire dans les horizons sableux, notamment au sein des poches sableuses tertiaires. Les formations résiduelles à silex ont parfois été remaniées en bordure de plateau : ces formations à silex remaniés, plus riches en silex, sont appelées *Bief à silex*.

Les *biefs à silex* sont des matériaux très hétérogènes présentant une matrice composée d'argile, de limon et de sable, dans des proportions variables. Les biefs à silex présentent des taux de silex > 65 %. Les silex sont fragmentés et emballés dans une matrice argilo-sableuse.

Les *limons à silex* peuvent être regroupés avec les biefs à silex dans la mesure où il s'agit d'une formation remaniée, riche en silex fragmentés, emballée dans une matrice limoneuse. Cette formation est située en bordure de plateau et parfois en pente, sur des superficies qui peuvent être relativement étendues.

- **Les limons des plateaux (LP)**

Le *complexe des limons des plateaux* recouvre la quasi-totalité des plateaux situés dans la zone d'étude. Les Limons des Plateaux forment de bonnes terres arables, ce qui explique les grandes cultures caractéristiques des plateaux normands. Ces formations, décarbonatées, nécessitent d'être amendées pour produire.

Il s'agit d'une formation allochtone éolienne, déposée par les vents catabatiques en contexte périglaciaire lors des périodes froides du Quaternaire. Cette formation se caractérise par un faciès limoneux relativement homogène, pouvant devenir plus argileux en certains horizons (lœss-lehms) ou sableux. La teneur en argile varie de 40 % dans les lœss-lehms (limons anciens), à 20-30 % dans les autres horizons. La puissance de cette formation varie du bord des plateaux vers le centre, où elle peut atteindre une dizaine de mètres (LCPC, 1969).

- **Les colluvions et les formations de pente (C)**

Les colluvions sont constitués de matériaux remaniés par le ruissellement, la solifluxion et accumulés sur les versants ou dans les fonds de vallons durant le Quaternaire (Kuntz, 1974). Ces formations remanient les formations du tertiaire, les limons des plateaux, les limons à silex et les biefs à silex, les formations résiduelles à silex, les faciès crayeux du Crétacé et parfois d'anciennes terrasses alluviales. Ce remaniement induit des très grandes variations de faciès, aussi bien latérales que verticales.

Les dépôts de colluvions sont plus nombreux sur les versants abrupts des vallées affluentes de la Seine. Leur épaisseur est très variable : elle peut varier de un à quelques mètres et peut atteindre parfois plus de 10 mètres.

- **Le complexe alluvionnaire**

Les formations alluvionnaires tapissent le fond des vallées. On distingue généralement :

- les alluvions récentes (Fz, Holocène), que l'on retrouve à l'affleurement en fond de vallée, souvent constituées d'éléments fins, limono-argileux, avec parfois des passages de lits tourbeux, correspondant aux formes subactuelles de dépôt. Leur extension maximale correspond grossièrement à l'extension des plus grandes crues ;
- les alluvions anciennes (Fx, Fy) situées sur des terrasses pour les plus anciennes, ou en fond de vallée sous les alluvions récentes pour les moins anciennes.

## **6.2. LIMITE GEOGRAPHIQUE DES FORMATIONS ALLUVIONS ET SABLES DU PERCHE**

L'extension d'une formation est définie par des données de forages et des observations d'affleurement. Dans le cadre de cette étude, l'emprise des alluvions et des sables du perche ont été déterminées en s'appuyant sur les logs géologiques des forages de la BSS, les affleurements de ces formations présents sur les cartes géologiques ainsi que sur des références bibliographiques spécifiques.

1- **Les contours des alluvions** prennent en compte l'ensemble des faciès alluvionnaires identifiés sur la carte géologique et dans les forages, hors colluvions.

2- **L'emprise des Sables du Perche** est définie par les données de forages, les données issues de la carte géologique et par des références bibliographiques. L'extension des sables du

perche vers le Nord est aujourd'hui mal connue et il existe actuellement deux hypothèses (schémas) d'extension dans la bibliographie :

- selon le rapport d'une étude sur l'extension des Sables du Perche menée par l'entreprise SAFEGE en 1993 [13], [14] et [15] (Illustration 18, Illustration 19), la formation des sables du Perche est (1) peu profonde entre les accidents de direction N120 (faille de l'Eure et faille de Senonches), qui a donc connu une remontée de l'ordre de 60 m et est recouvert par des argiles à silex d'une épaisseur moyenne de 15 m, (2) au nord de la faille de Senonches, un approfondissement rapide vers le NNE plaçant les Sables du Perche à 88 m de profondeur sous la craie marneuse (d'âge Turonien ?) ;

- la formation s'étendrait seulement entre les accidents de direction N120 correspondant aux failles de l'Eure (au sud) et de Senonches (au Nord) :

- les notices de la carte géologique (n°215, n°214) indiquent qu'au Cénomaniens, le rejeu de la faille de Senonches influence la répartition des faciès sableux au Sud et carbonaté au Nord ; et par conséquent limite l'extension des sables du Perche vers le Nord-Est. Elle forme la limite septentrionale de l'éperon du Perche au Jurassique et au Crétacé ;
- Juignet (1974) place la limite d'affleurement des Sables du Perche au niveau de l'axe du Merlerault. Cette direction privilégiée de fracturation correspond dans notre secteur d'étude à la faille de Senonches (Illustration 20) ;
- l'étude des coupes géologiques et des logs validés de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM, montre qu'aucun forage au Nord de la faille de Senonches ne décrit la formation des Sables du Perche (Illustration 32).

Notons qu'au Nord de la faille de Senonches :

- peu de forages de la BSS suffisamment profonds atteignent le mur de la craie de Rouen. Ils ne recoupent donc pas la formation des sables du Perche sous-jacente si elle existe ;

- à l'inverse, les forages profonds indiquent des faciès sableux qui correspondent aux faciès de la base du Cénomaniens, unité permettant la transition avec les faciès sableux de l'Albien (REF) mais qui sont parfois interprétés comme appartenant à la formation de sables du Perche. Ces mauvaises interprétations peuvent entraîner des surestimations de l'extension latérale de la formation. Par exemple, les forages 02156X0001 et 02158X0004 traversent des épaisseurs de formations sableuses de 56 et 41 m. Ces niveaux sableux correspondent soit à des lentilles sableuses intercalées au sein des formations du Cénomaniens, soit à la base du Cénomaniens.

- le forage profond 02157X0004 entre Beauche – Boissy les Perches indique une disparition des Sables du Perche.

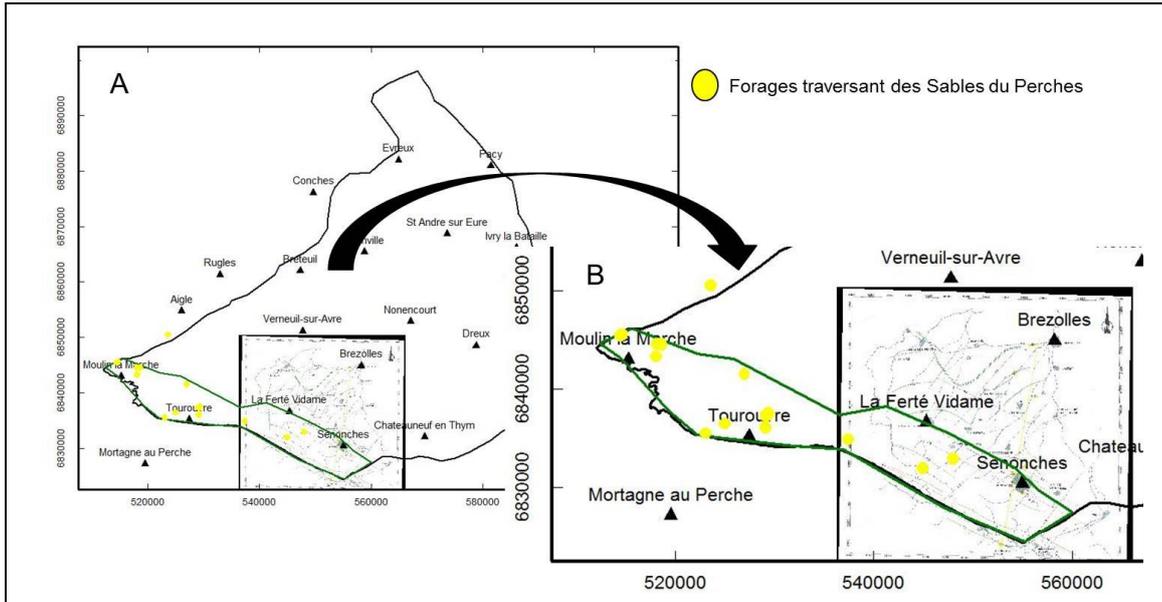


Illustration 18 : Carte de la géométrie et de l'extension des sables du Perche

Carte initiale (A) et zoom de la zone d'intérêt (B) représentant les forages traversant la formation des sables du Perche (en jaune) auxquels il est superposé la carte de la limite de l'extension des sables du Perche au Nord Est de la faille de Senonches (carte du rapport SAFEGE)

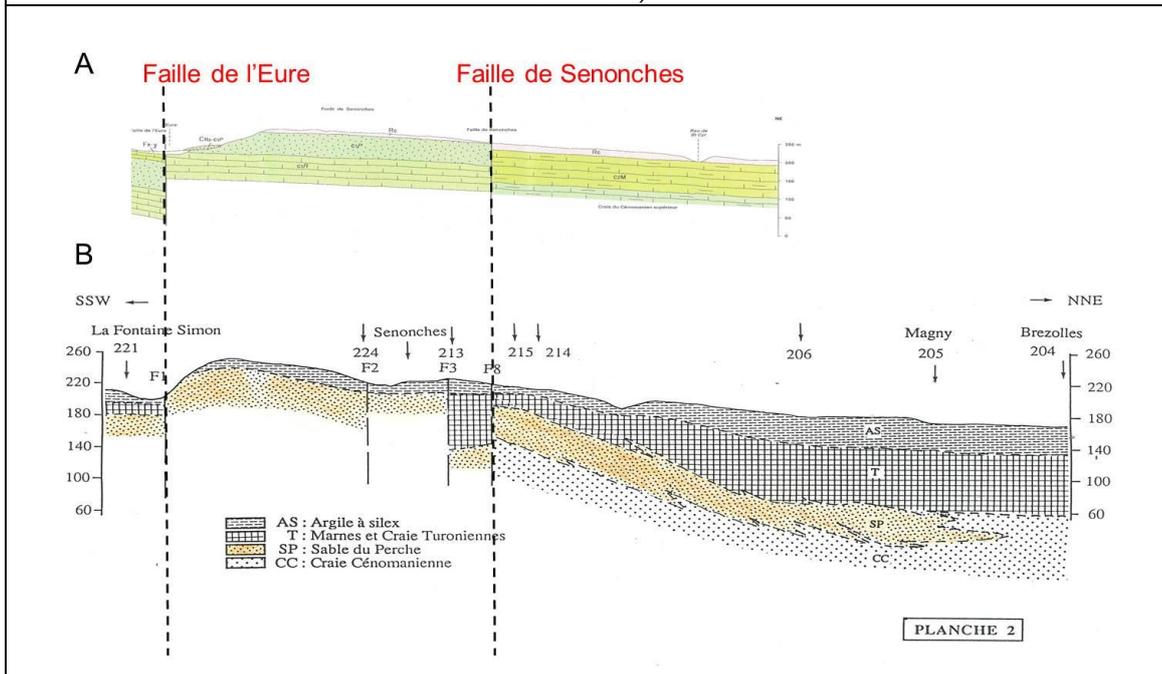


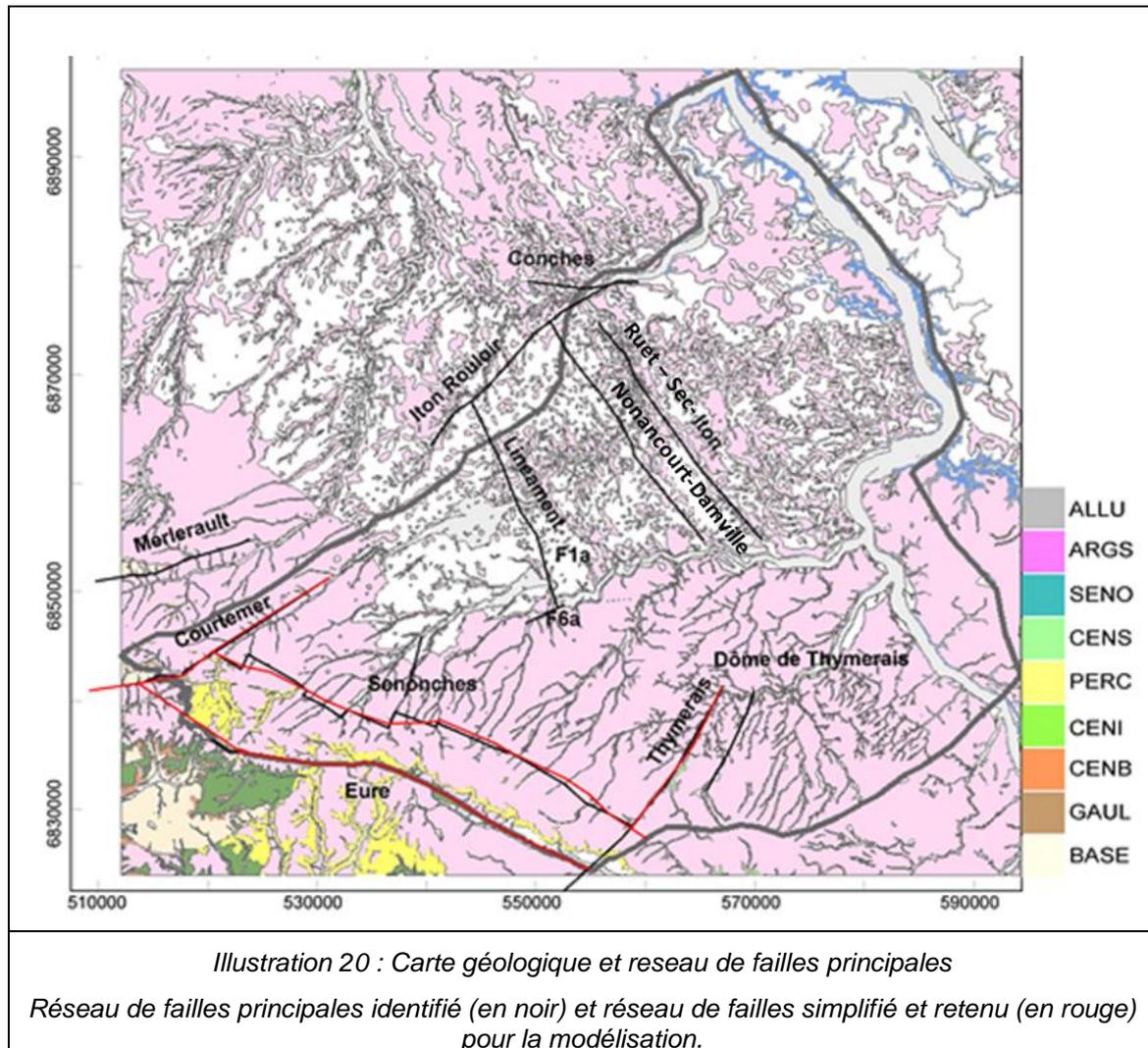
Illustration 19 : Coupe géologique montrant la géométrie et l'extension des Sables du Perche

(A) coupe de la notice de la carte géologique n°253 montrant une rupture de dépôt des Sables du Perche le long de la faille de Senonches ; (B) coupe du rapport SAFEGE [14] et [15], montrant une extension du faciès au Nord Est de la faille.

### 6.3. SCHEMA STRUCTURAL : DEFINITION DU RESEAU DE FAILLES

La modélisation géologique a intégré un schéma structural simplifié. Un jeu de failles a été sélectionné à partir de la carte géologique harmonisée et des différentes cartes et notices géologiques 1/50 000 de la zone selon les critères suivants :

- des rejets d'accidents mentionnés dans les publications et les notices de cartes géologiques à 1/50 000 ;
- des extensions des accidents compatibles avec l'échelle du modèle ;
- un minimum de logs géologiques disponibles de part et d'autre des failles.



Plusieurs failles sont identifiées :

**La faille de Merlerault :** Faille se situant en bordure de l'emprise du modèle, à l'Ouest, de direction N60 à N70°E, passant à N110°E via un jeu de failles N20°E et de rejet estimé entre 50 et 100 m (notice carte géol. n°214 p.61).

**Faille de Courtemer - Moulins-La-Marche :** faille inverse de direction N50 à N80°E, à pendage nord de 70° et possède un rejet de 40 m qui peut atteindre 130 m à Courtemer. Notons que la zone d'étude ne contient pas le secteur situé entre Courtemer et Moulins. La zone d'étude comprend la partie de la Faille située au Nord de Moulins (notice carte géol. n°214 p. 62). A l'Est de Moulins, la faille de Courtemer se subdivise en plusieurs branches qui

semblent se rejoindre à Bonnefoi, la faille médiane se prolongeant en rive gauche de l'Iton. Au Nord de Bonnefoi, elle est attestée par un décalage des assises du Turonien inférieur entre les sondages 02147X0036 et 02147X0042.

**Faille de l'Eure** : faille normale verticale, de direction N110°E, varisque, ayant joué à plusieurs reprises au Mésozoïque.

**Faille de Senonches** : nommée axe de Senonches (ou axe de Merlerault), est une faille décalée par des failles N20E. Elle semble limiter l'extension des sables du Perches vers le Nord-Est (cf. § 6.2, page 54) (notice carte géol. n°214 p. 62, géol. n°214 page 62). La structure même de l'accident est inconnue : s'agit-il d'une faille simple, en faisceau, d'une faille flexure, d'une flexure? Comme les autres accidents de la région, elle est interprétée comme une faille. Musset [38] note que la structure de Senonches partiellement résolue en faille a permis la ride du Thymerais.

**Faille Ruet/Sec-Iton** : faille qui se prolonge sur le plan de fracturation de la vallée du Ruet [39].

**Faille Iton-Rouloir** : axe supposé, tracé par G. Kuntz en 1982 sur la carte géologique 1/50.000 de Beaumont-le-Roger (archive BRGM).

**Faille F1-F8** : (non localisée sur l'illustration 20, notice carte géol. 215) il s'agit d'un réseau hydrologique affecté par des linéaments à l'est de Verneuil et à Tillières sur Avre comprenant deux linéaments géomorphologique orientés N70. Ils ont une origine (i) soit structurale (failles, flexures ou champs de diaclases) (ii) soit dus à des variations lithologiques de la craie (par exemple la limite Turonien/Sénonien, des surfaces durcies de la craie, ...). Notons qu'à l'intersection de ces linéaments des résurgences importantes existent.

**F1a** : (campagne géophysique du BRGM de mars 2013 – cf. §5) il existerait une faille de direction N165° similaire à celle des failles de Breteuil-sur-Iton. Un possible prolongement de ces structures sur Verneuil-sur-Avre est possible par l'intermédiaire de la faille F1a.

**F6** : (campagne géophysique du BRGM de mars 2013 – cf. §5) la faille serait de direction N65° similaire à celle de la Faille de Merlerault et de Courtomer.

**Demi-dôme du Thymerais** : il s'agit d'une remontée des couches limitées par des failles au Sud.

Les failles décrites ci-dessus et tracées sur la carte illustration 20 participent à la réflexion pour la construction du modèle. Certaines d'entre elles ont été éliminées de l'interpolation à défaut de données de forages. Par conséquent, les données relatives aux failles de **Courtomer, Senonches, l'Eure et les failles constituant le demi-dôme de Thymerais** ont servi au calcul de l'interpolation des surfaces géologique. Certaines des failles non prises en compte dans le modèle géologique, le seront en revanche dans le modèle hydrogéologique.

D'autres failles sont identifiées mais non retenues à la réflexion pour la construction du modèle pour diverses raisons : trop faible rejet, absence d'informations les concernant (données de forage pour évaluer le jeu de la faille). Certaines de ces failles ont un faible impact sur la géologie (faible rejet) mais un fort impact sur l'hydrogéologie (blocage des écoulements) ; dans ce cas ces failles seront prises en compte dans le modèle hydrogéologique :

**Faille de Mortagne-au-Perche** : il s'agit d'une conjugaison de fractures profondes de direction N70 à N150°E, antécambriennes probables et réactivées, probablement en lien avec la faille de l'Eure.

**F1-b-c-d, F2, F3** : (campagne géophysique du BRGM de mars 2013 – cf. §5) les failles auraient une direction de N165° similaire à celles des failles connues le long de Breteuil sur Iton.

**F8** : (campagne géophysique du BRGM de mars 2013 – cf. §5) la faille aurait une direction de N75° et appartiendrait à la même famille que la faille F6, et décroche en F1 vers l'Est.

**Ensemble Linéaments NE direction 165° (G.Kuntz)** : (notice caret géol. 180: fig. 5 p.34) plusieurs failles ou flexures hypothétiques sont identifiées selon G. Kuntz : il peut s'agir d'alignements de gisements sableux piégés dans les dépressions karstiques de la craie (NW-SE). Ces linéaments peuvent aussi correspondre aux ressauts morphologiques de direction NS, rectilignes près de Bailleul et courbes près de Damville.

**Flexure de Dreux** : (notice carte géol. n°216 p.57-59) et **escarpement du Rupélien** (notice carte n°216 p.57-59) : ces flexures, distinctes, correspondent à la signature de fracturation de la craie, jouant essentiellement un rôle dans la circulation des fluides.

**Grossoeuvre** : (notice carte géol. 180) : il est observé un décalage de 80 m entre deux forages séparés de 2 km avec une remontée du bloc à l'Ouest. Il s'agirait d'un panneau faillé de direction NS.

**Au SE de Breteuil** : Cette faille marque la limite Ouest de l'affleurement de sables Stampien : le bloc à l'Est semble s'être relevé depuis le Stampien.

## 6.4. PRINCIPE DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D SOUS GDM-MULTILAYER

Le modèle géologique a été réalisé en utilisant le logiciel GDM (Geological Data Management - <http://gdm.brgm.fr/?lang=en> ) et son composant MultiLayer (Bourguine et al, 2008). GDM et MultiLayer sont développés tous deux par le BRGM.

GDM est conçu pour manipuler des données géologiques et effectuer toute visualisation 1D, 2D ou 3D de ces données, pour la construction de surfaces correspondantes au toit/mur de formations géologiques ou filons minéralisés. Le module MultiLayer permet pour sa part de construire des modèles géologiques dans des contextes géologiques type bassin sédimentaire peu tectonisé. L'intérêt de ce module est de pouvoir combiner différents types de données (sondages, cartes géologiques, modèle numérique de terrain, coupes géologiques ou géophysiques calées, ...). Par ailleurs ce module permet de définir un *workflow* de construction du modèle avec vérification des données, gestion des paramètres de calcul, contrôles de cohérence entre les différents types de données, génération automatique du modèle, restitutions graphiques 2D ou 3D, etc...

GDM permet d'intégrer des données provenant de formats standards, en particulier de SIG type ArcGIS® ou équivalent. Les résultats peuvent également être exportés vers ces standards ainsi que des logiciels de simulation hydrodynamiques comme le logiciel Marthe (développé également au BRGM).

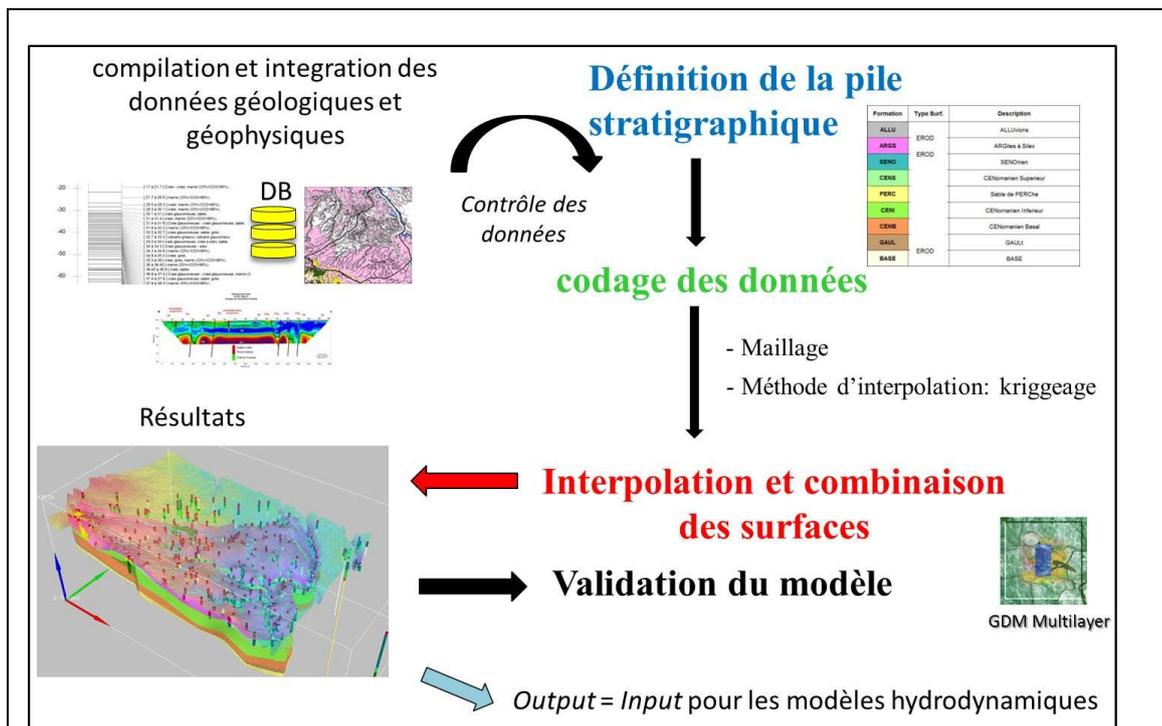


Illustration 21 : Principe de modélisation avec GDM-Multilayer

La construction du modèle géologique est basée sur trois étapes : (i) la définition d'une pile stratigraphique décrivant la succession des formations et les relations entre deux formations successives ; (ii) l'interprétation des données (leur « codage ») selon le cadre fourni par cette pile ; (iii) l'interpolation des surfaces (les interfaces entre formations) et leur combinaison en fonction des données et de la logique induite par la pile stratigraphique.

Plusieurs étapes sont en général nécessaires :

- recherche des différentes données disponibles ;
- récupération et mise en forme éventuelle de ces données ;
- transfert de ces données vers le logiciel de modélisation ;
- construction du modèle géologique ;
- export du modèle vers les outils permettant de l'exploiter.

Les différentes étapes à la construction du modèle géologique du Bassin de l'Avre sont détaillées dans la suite du rapport. Elles consistent :

**1) à rechercher les différentes données nécessaires et disponibles** : ces données sont de différents types :

- sondages décrivant les formations intersectées ;
- cartes géologiques d'échelle appropriée : sous forme vecteur et/ou sous forme raster ;
- coupes géologiques ou géophysiques faisant apparaître les interfaces à modéliser ;
- mesures de terrain (points de contact entre les formations à modéliser, mesures de pendage) ;
- cartes topographiques ;
- modèle numérique de terrain ;
- limite de la zone à modéliser ;
- limites d'extension maximale des formations (dans le cas où ces limites sont connues) ;
- tracés des failles à prendre en compte ;
- grilles d'anciens modèles géologiques s'il en existe ;
- bibliographie (notices de cartes géologiques, rapports de fin de sondages, publications sur la géologie du secteur, rapports d'études géologiques, etc...).

**2) à récupérer et mettre en forme des données**

Les différents types de données cités ci-dessus sont ensuite rassemblés. Si ces données sont sous forme papier ou image, il faut les numériser (par exemple digitaliser les points de contacts de la carte géologique à partir d'un scan de la carte papier). En général ces données sont rassemblées dans des bases de données et visualisées à travers un SIG.

Cette phase comprend les étapes suivantes :

- numérisation des points de contact entre formations à partir de la carte géologique raster, ou sélection des contacts appropriés si on dispose d'une carte vecteur ;
- saisie des sondages dans une base de données type ACCESS ou plus simplement dans EXCEL ;
- numérisation des coupes géologiques ou géophysiques ;
- récupération de la grille modèle numérique de terrain sur la zone concernée, à la résolution adaptée ;
- si une carte géologique vecteur est utilisée, il peut être nécessaire d'adapter la carte de façon à ce que la liste des formations présentes sur la carte corresponde à la liste des formations à modéliser (ce qui peut amener par exemple à fusionner plusieurs formations géologiques de la carte qui sont regroupées en une seule dans le modèle) ;
- ces différentes données doivent, le cas échéant, être converties en des formats lisibles par le logiciel de modélisation géologique.

## 6.5. TRANSFERT DES DONNEES VERS GDM

GDM accepte un assez grand nombre de formats de bases de données « standard » (ACCESS, Oracle, MySQL, Postgre SQL, Excel, ...) et peut importer des données des principaux SIG.

## 6.6. LA PILE STRATIGRAPHIQUE

La première étape consiste à définir la pile litho-stratigraphique des formations à modéliser. Cette étape est d'ailleurs réalisée avant la mise en forme des données de façon à rassembler des données cohérentes avec la liste des formations à modéliser.

En plus de la liste des formations à modéliser, on doit définir la chronologie ainsi que les relations entre deux formations successives. Celles-ci peuvent être de deux types : ONLAP lorsqu'une formation s'est déposée sur la précédente, ou « ERODE » lorsqu'une phase d'érosion a eu lieu entre le dépôt des deux formations.

Dans notre étude, neuf formations sédimentaires (multicouches) décrites par la pile géologique (litho-stratigraphique) (Illustration 22) sont modélisées. La pile a été déduite de l'analyse géologique des différents faciès du système qui est exposée dans le chapitre 6.1.

Code Pile	Surface	Formations individualisées dans le modèle géologique	Formations géologiques incluses
ALLU	EROD	ALLUvions	Alluvions
ARGS		ARGiles à Silex	Argiles à silex
SENO		SENOien	Craies du Sénonien et du Turonien Moyen et Supérieur
CENS		CENomanien Supérieur	Craies du Turonien inférieur et du Cénomaniens Moyen et supérieur
PERC		Sable de PERChe	Sables du perche
CENI		CENomanien Inférieur	Craies sableuses, marneuses du Cénomaniens inférieur
CENB		CENomanien Basal	Glauconie de base
GAUL		GAULt	Argiles de gault et sables de l'albien/aptien
BASE		BASE	Formations ante-cretacé

*Illustration 22 : Pile litho-stratigraphique utilisée pour la modélisation géologique*  
 9 formations ont été définies (cf. chapitre 6.1) : de la formation la plus ancienne (BASE) à la plus récente (ALLU). Les formations Gault, argiles à silex et alluvions reposent en érosion sur les formations sous-jacentes à ces dernières, les autres formations sont en *onlap*.

La pile litho-stratigraphique utilisée pour le modèle a été adaptée afin de mieux correspondre aux besoins de la modélisation hydrogéologique. Cela s'est traduit par le rattachement du Turonien moyen et supérieur à l'entité (SENO) (craie du Sénonien sèches, à très fort taux de carbonate de calcium, à silex), tandis que le Turonien inférieur au caractère relativement marneux a été associé aux craies du Cénomaniens moyen et supérieur (CENO). Les craies du Cénomaniens ont été séparées en 2 unités dans le modèle (CENS) et (CENI) car dans un secteur du modèle une autre formation (PERC) vient s'intercaler entre les 2. CENS et CENI ont

donc dues être distinguées sur l'ensemble du modèle pour cette raison. Les formations GAUL et BASE représenteront dans le modèle hydrogéologique sous le logiciel Marthe le mur de l'aquifère modélisé et pourront être regroupés.

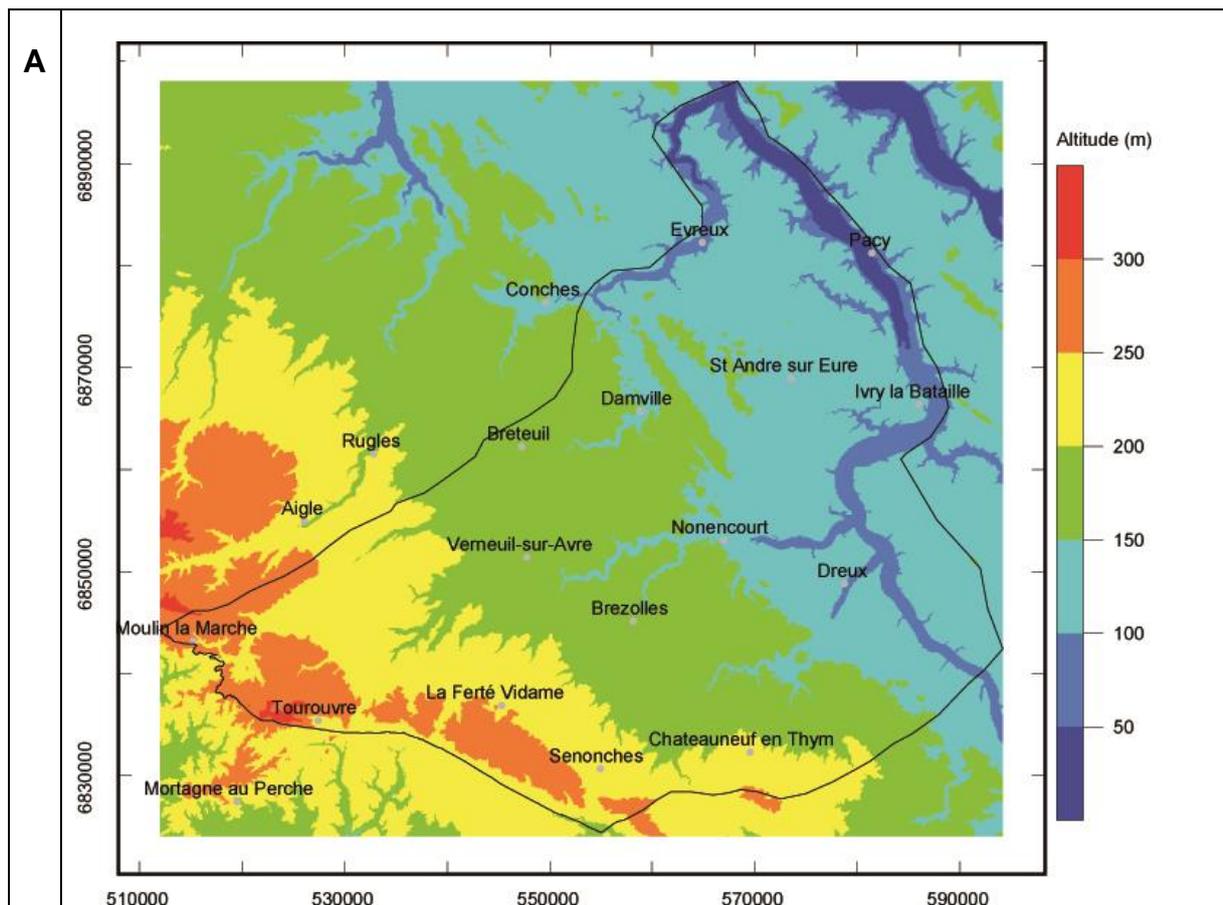
Dans un souci de cohérence des données servant à la modélisation, les logs géologiques ont été codés selon la pile litho-stratigraphique.

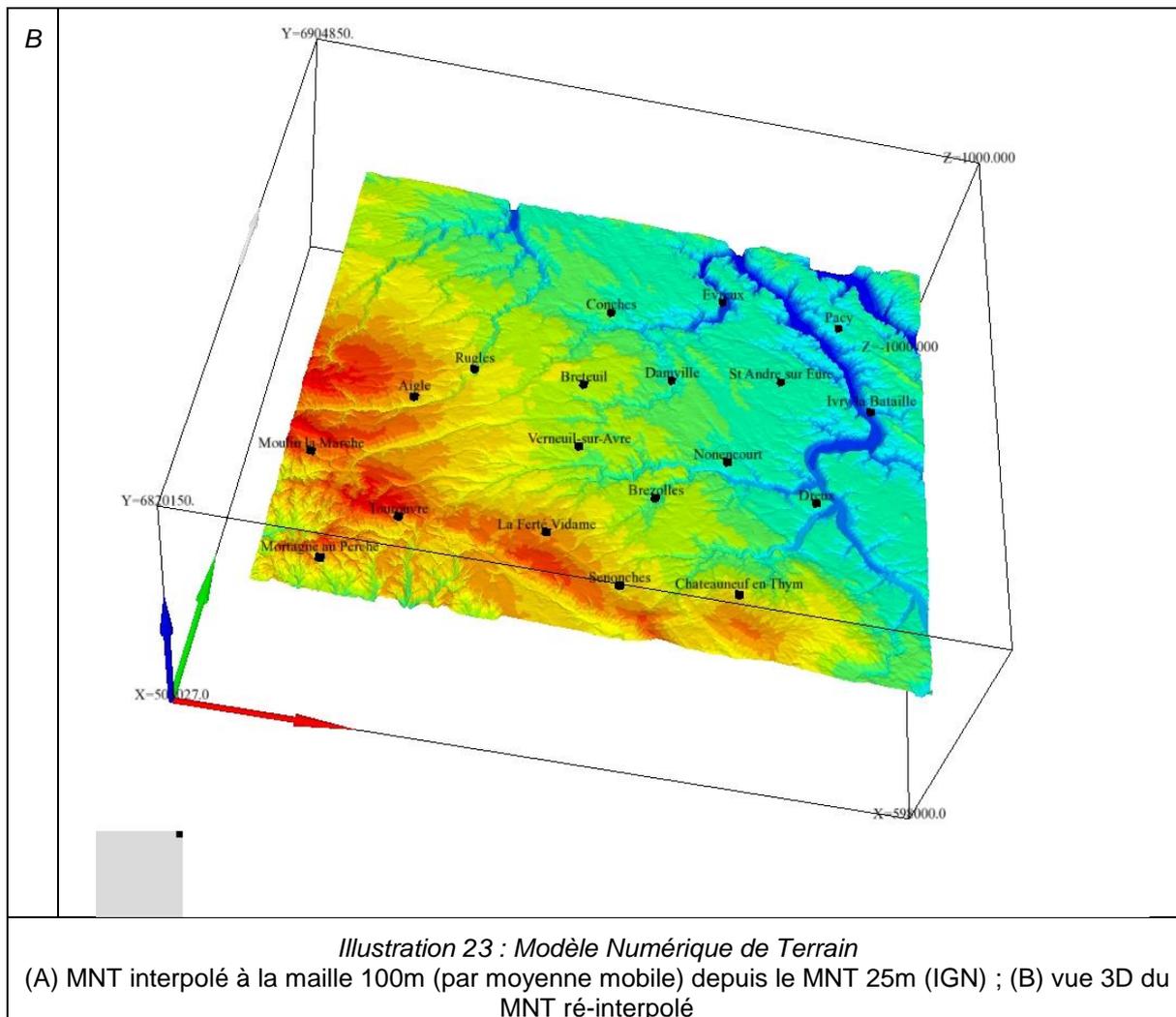
## 6.7. PREPARATION DE LA DONNEE DISPONIBLE

La projection utilisée pour la construction du modèle est le Lambert 93.

### 6.7.1. MNT (Modèle Numérique de Terrain)

Il a été intégré au modèle un MNT (BD ALTI de l'IGN au pas de 25 m) ré-interpolé pour correspondre à la maille du Krigeage (100 m) par la méthode d'interpolation **moyenne mobile**.

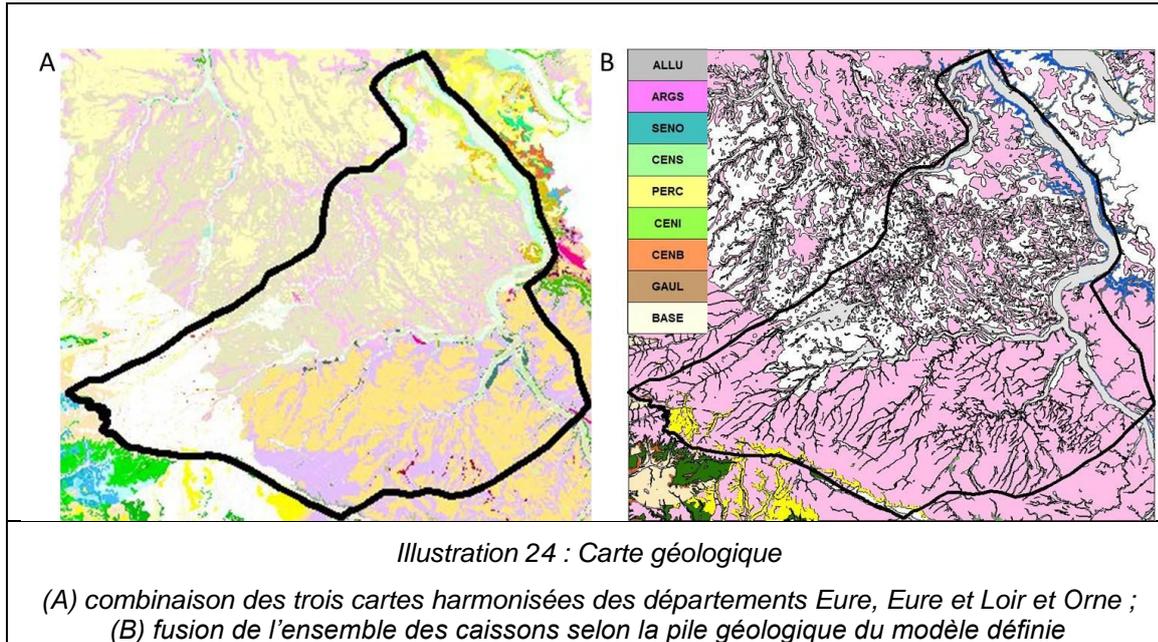




### 6.7.2. Carte géologique synthétique

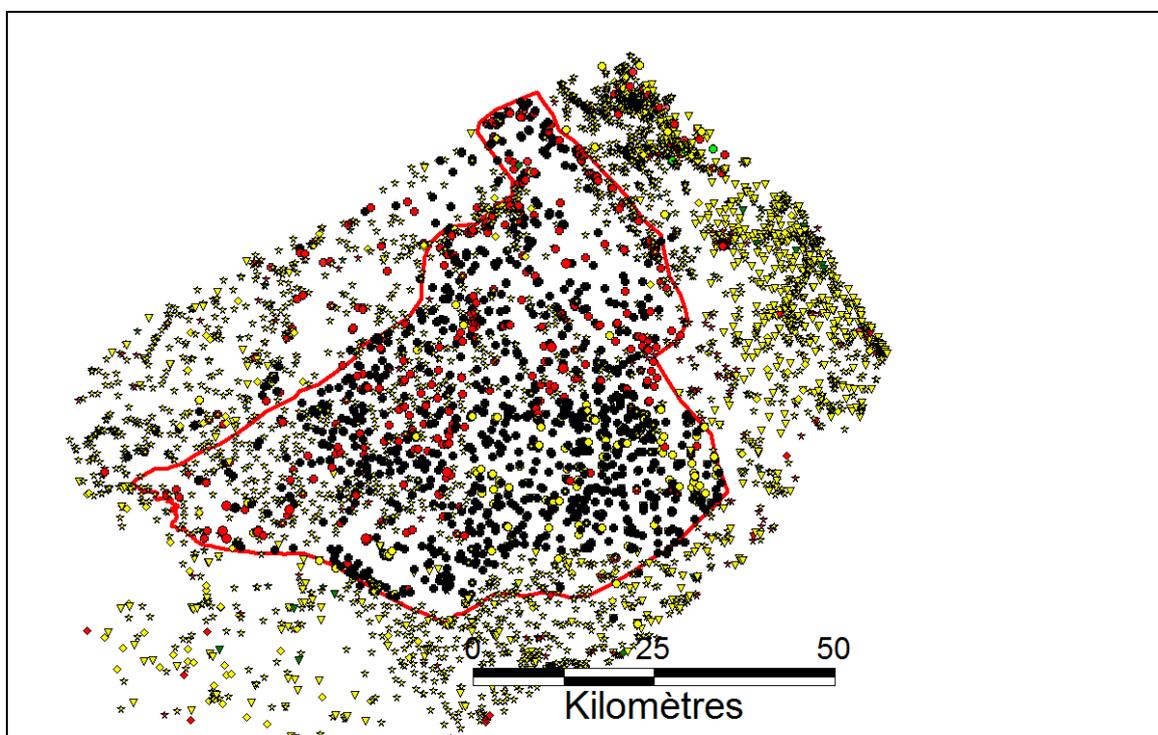
Les cartes départementales harmonisées recoupant l'emprise de la zone d'étude, les cartes de l'Eure, l'Eure et Loir et l'Orne, ont été utilisées pour constituer une carte géologique sur la base des formations identifiées dans la pile litho stratigraphique.

Le travail a consisté à (1) regrouper les caissons des cartes géologiques harmonisées selon la pile définie et leur imposer le code correspondant à la formation de la pile définie, (2) à fusionner l'ensemble des caissons pour chaque formation, (3) extraire des polygones et polygones qui sont par la suite intégrés dans GDM-Multilayer.



### 6.7.3. Identification et codage de « logs »

Au total, 5553 logs ont été extraits de la BSS dont seulement 782 possèdent une coupe géologique numérique. 1074 logs n'ont pas été retenus car ils ne possédaient pas d'informations numériques exploitables et 3945 ouvrages n'ont pas été utilisés car ils sont dépourvus d'informations géologiques (Illustration 25).



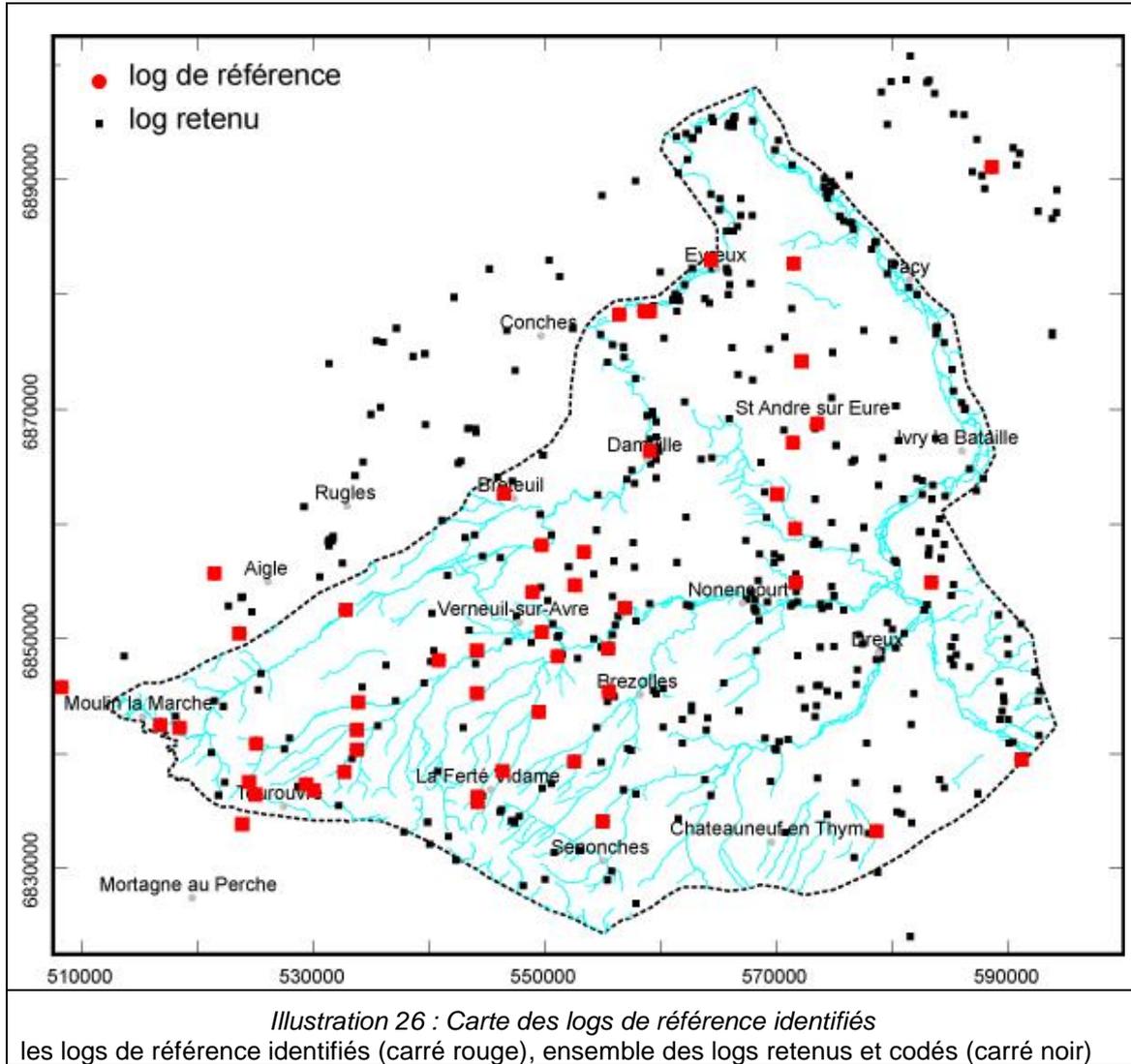
	Nombre de logs
Log consultés et conservés	534
Log consultés non retenus (document numérique associés consultés mais sans information utilisable)	1074
Ouvrages sans information géologique	3945

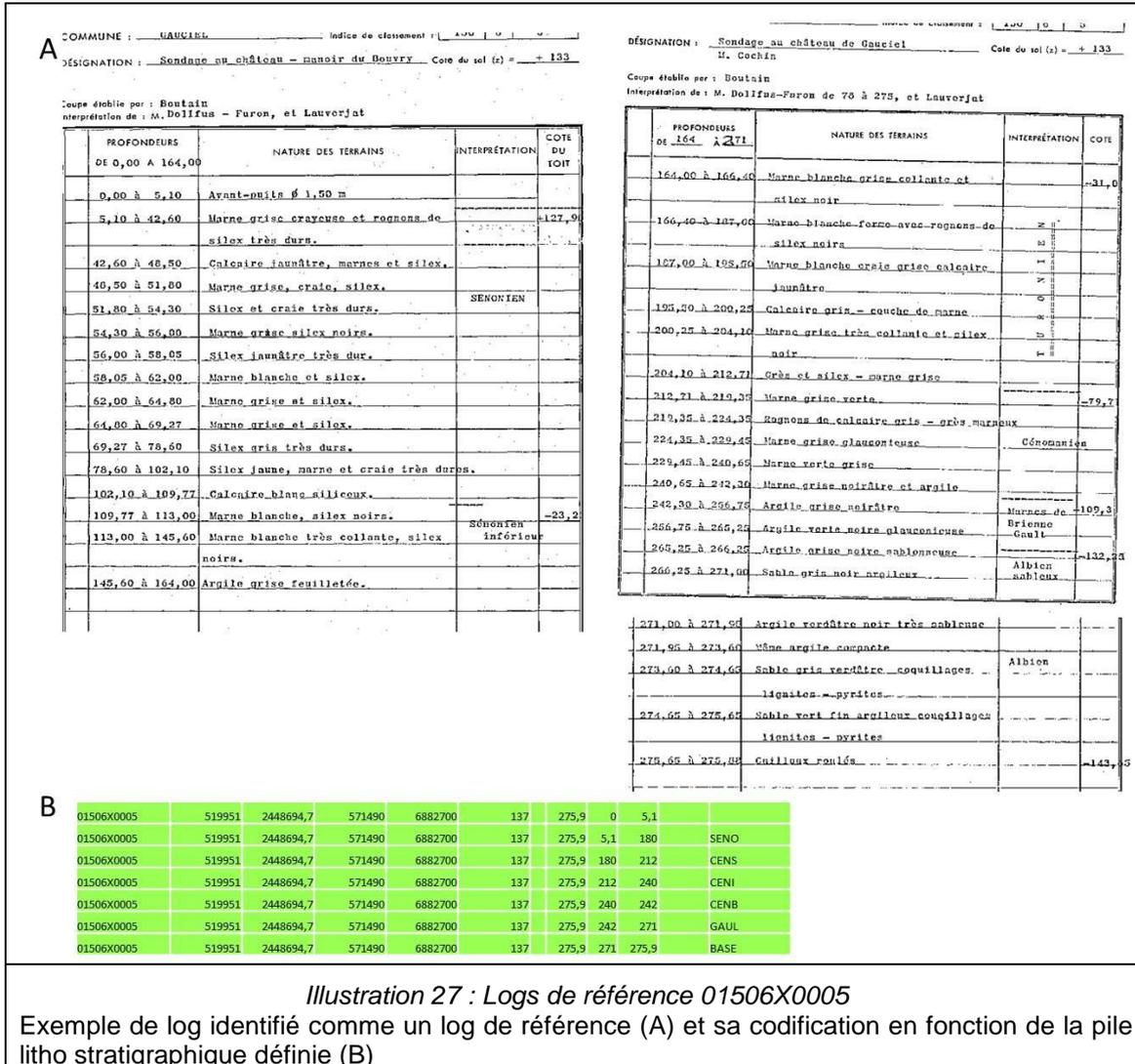
*Illustration 25 : Carte de l'ensemble des données disponibles dans la BSS (A) et tableau récapitulatif des travaux effectués sur l'ensemble des données (B)*

(A) Dans l'emprise du modèle, les ronds rouges et jaunes représentent les logs retenus et codés selon la pile géologique définie pour le modèle, les ronds noirs sont les logs consultés mais non retenus pour le modèle, les autres points (étoiles jaunes) sont les données enregistrées dans la BSS mais ne disposant pas de coupe foreur. En dehors de la zone d'étude plusieurs logs ont été regardés et parfois codés correspondant soit à des coupes profondes (forages de référence), soit permettant de contraindre les limites du modèle.

534 logs géologiques disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) ont toutefois pu être exploités (Illustration 26) : ils ont été réinterprétés et codifiés selon la pile définie.

Pour ce faire, nous avons sélectionné 40 logs de référence (Illustration 26 et Illustration 27) sur trois critères principaux : (1) logs disposant d'une description suffisamment précise pour permettre une interprétation non équivoque ; (2) logs pénétrant jusqu'à une profondeur suffisamment importante pour traverser plusieurs formations ; (3) logs répartis de façon relativement homogène à l'échelle de la couverture sédimentaire du Bassin de l'Avre. Les passes des coupes de références ont été regroupées et codées. Elles ont servi de base à l'interprétation des autres données consultées lors de cette étude, issues de la Banque du Sous-Sol et des cartes géologiques harmonisées.





La carte géologique a permis (1) d'imposer des points de passage en surface et (2) de vérifier la cohérence avec les données issues des sondages. Les contours (polylignes) et des polygones n'ont pas été intégrés dans le calcul de l'interpolation. Seulement, des points de passage ont été imposés en surface. Une vérification de la cohérence entre les données de sondages (première passe) et les données de la carte géologique a été effectuée.

Notons que seulement une trentaine de forages (> 100m de profondeur) recoupent plusieurs séries géologiques profondes.

Les données de sondages étudiées sont très hétérogènes : certaines coupes sont très précises et très bien décrites, néanmoins les coupes peuvent être peu précises nécessitant un lourd travail d'interprétation du géologue (notamment pour les sondages < 50m). La validation de ces sondages a été réalisée par le géologue référent et aussi à l'aide des notices géologiques et de la bibliographie existante (Thèse de E. Lasseur, 2005). Des données complémentaires ont été recherchées dans les références bibliographiques et les différents rapports existant sur la zone (cf. bibliographie). Par exemple, peu de données permettent de caractériser précisément l'extension des sables du Perche (Cénomannien supérieur basal) au Nord de la faille de

Senonches (§ 6.2, page 54), et notamment leur changement latéral progressif de faciès vers le Nord-Est.

Notons aussi que la BSS contient des logs vérifiés qui ont nécessité une recodification d'après les logs de références interprétés. Ceci est en partie dû à de nouveaux résultats obtenus après la vérification de ces logs dans le cadre des travaux de recherche d'Eric Lasseur (thèse, 2007).

Par exemple le log présenté dans l'illustration 28 a nécessité une recodification suite aux récents travaux de recherche. Le document foreur (A) permet d'identifier le niveau repère Turonien inférieur caractérisé par de la craie dépourvue de silex (cf. § 6.1.3). Ce niveau n'est pas identifié dans le log validé (B). Comme décrit dans le paragraphe 6.1.3, ce niveau, isopaque de 20 m, permet de positionner la base de la formation sénonienne (SENO) à une profondeur de 28 m par rapport à la tête de forage. Par conséquent, une recodification a été effectuée (C).

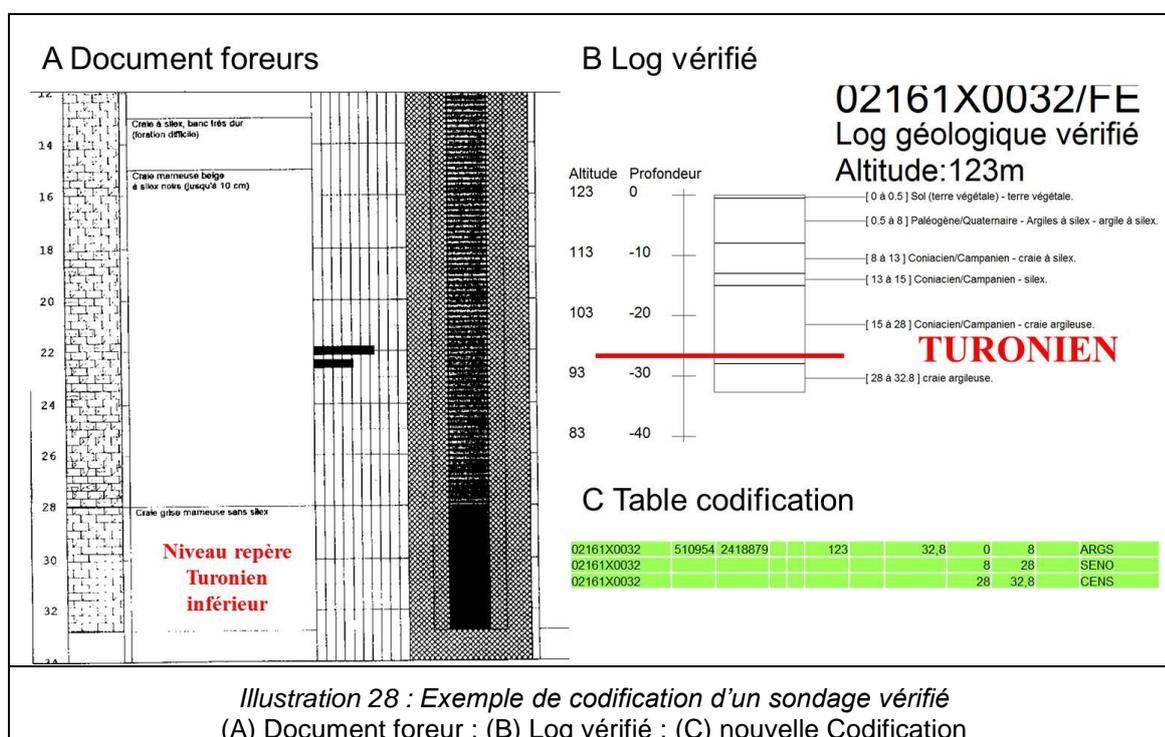
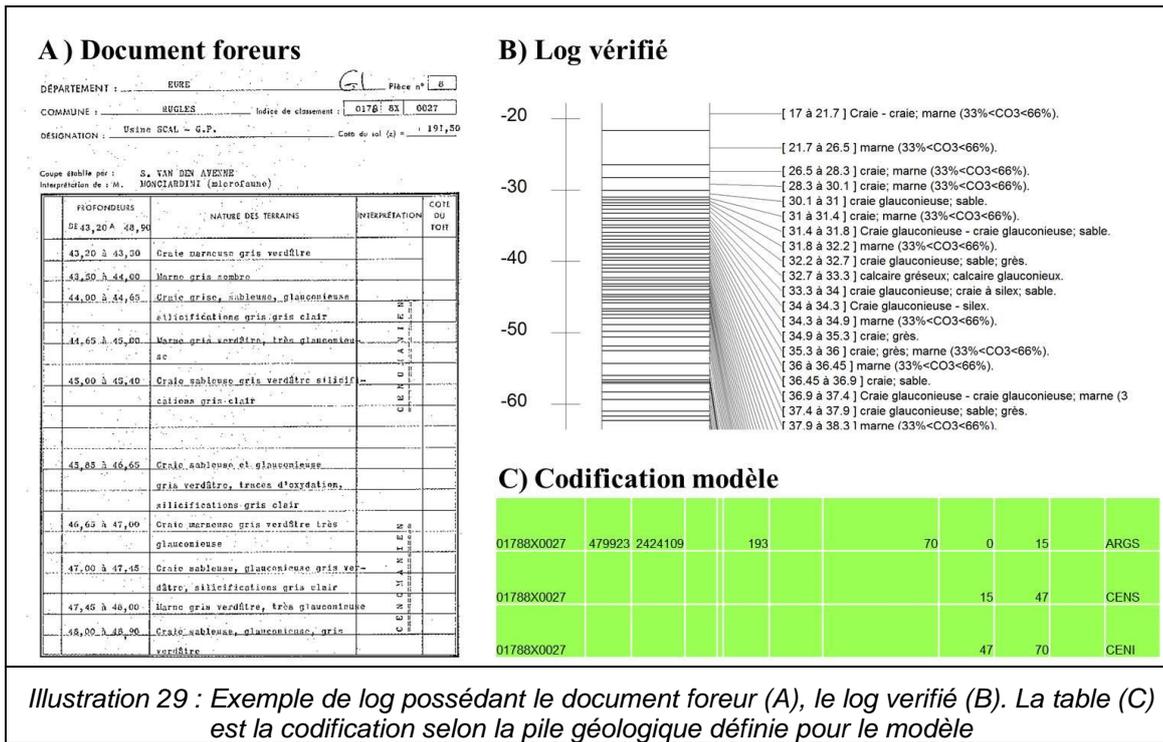


Illustration 28 : Exemple de codification d'un sondage vérifié  
(A) Document foreur ; (B) Log vérifié ; (C) nouvelle Codification

L'illustration 29 montre également une donnée de BSS possédant un document foreur et un log vérifié. Dans le document foreur, l'ensemble des passes est identifié d'âge Cénomaniens. Dans le log vérifié, aucun âge n'est précisé. Seule une description des passes successives est donnée, provenant du document foreur initial. Ici, il faut regrouper les passes depuis leur description selon les codes identifiés (Illustration 29 C).



N° BSS	X L2e	Y L2e	X L93	Y L93	Z foreur	Z tete MNT	Prof total	Prof début	Prof fin	Epaisseur	Codification	Passé fictive	Description
02152X0047	489582.5	2413872.2	540853	6848153	180		40.71	13	24	11	ARGS		
02152X0047	489582.5	2413872.2	540853	6848153	180		40.71	24	40.71	16.71	SENO		
02152X0048	492848.4	2414710.2	544123	6848964	188		93	1.1	26.2	25.1	ARGS		
02152X0048	492848.4	2414710.2	544123	6848964	188		93	26.2	37.8	11.6	SENO		
02152X0048	492848.4	2414710.2	544123	6848964	188		93	37.8	93	55.2	CENS		
02152X0049	492803.4	2414700.2	544078	6848954	188		53	2	27	25	ARGS		
02152X0049	492803.4	2414700.2	544078	6848954	188		53	27	35	8	SENO		
02152X0049	492803.4	2414700.2	544078	6848954	188		53	35	45	10		x	connait pas l'limite SEN0/CENS
02152X0049	492803.4	2414700.2	544078	6848954	188		53	45	53	8	CENS		
02152X0050	488914.9	2417934.6	540219	6852218	204		42	0	20	20	ARGS		
02152X0050	488914.9	2417934.6	540219	6852218	204		42	20	42	22	SENO		
02152X0050	489581	2413872	540851	6848153	188		30	1	13	12	ARGS		
02152X0052	489581	2413872	540851	6848153	188		30	13	30	17	SENO		???
02152X0001	492749.3	2413584.6	544015	6847840	189		58	0.45	6.8	6.35	ARGS		
02152X0001	492749.3	2413584.6	544015	6847840	189		58	6.8	30	23.2	SENO		
02152X0001	492749.3	2413584.6	544015	6847840	189		58	30	58	28	CENS		
02153X0001	496268	2417759	547566	6851982	172.68		42.65	0	30	30	ARGS		
02153X0001	496268	2417759	547566	6851982	172.68		42.65	30	42.65	12.65	SENO		
02153X0002	498968	2419162.2	550276	6853362	168.2		19.4	0	19.4	19.4	ARGS		
02153X0016	495524.1	2415512.7	546804	6849743	163		17.15	0.4	9.6	9.2	ALLU		
02153X0026	495524.1	2415512.7	546804	6849743	163		17.15	9.6	17.15	7.55	SENO		
02153X0040	497587	2419901	548902	6854112	173		55	0.5	32	31.5	ARGS		
02153X0040	497587	2419901	548902	6854112	173		55	32	55	23	SENO		
02153X0041	498439.8	2416430.4	549725	6850636	153		17	0.5	17	16.5	ALLU		
02153X0042	498439.8	2416430.4	549725	6850636	153		50	0	9	9	ALLU		
02153X0042	498439.8	2416430.4	549725	6850636	153		50	9	22	13	ARGS		
02153X0042	498439.8	2416430.4	549725	6850636	153		50	22	50	28	SENO		possible CENS à 38m mais peu probable avec forages prox
02153X0043	499945	2416140	551227	6850333	148.9		38.85	0.8	6.85	6.05	ALLU		
02153X0043	499945	2416140	551227	6850333	148.9		38.85	6.85	11.45	4.6	ARGS		
02153X0043	499945	2416140	551227	6850333	148.9		38.85	11.45	15.24	3.79	SENO		
02153X0043	499945	2416140	551227	6850333	148.9		38.85	15.24	38.85	23.61	CENS		

**Illustration 30 : Table de codification des forages**

L'ensemble des codifications des passes de sondages se trouve dans une table \*.xlsx (Illustration 30) qui est par la suite connectée au logiciel GDM pour vérification et contrôle de cohérence des données et ce en trois dimensions.

## 6.8. CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE

La construction du modèle consiste à interpoler les données (décrites ci-avant et intégrées) selon une méthode d'interpolation choisie et définie, à combiner les résultats de l'interpolation et à créer des grilles contenant les côtes du toit et du mur des unités modélisées et l'épaisseur de chaque couche.

### 6.8.1. Définition de la grille de calcul

Une première grille de calcul est définie à la maille carré 250 m, qui représente environ 124124 mailles sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette grille est utilisée pour l'interpolation des interfaces. Le modèle final sera alors ré-interpolé selon une nouvelle grille à la maille 100 m, soit un total de 609000 mailles environ.

Les données intégrées dans GDM-Multilayer sont codées selon la pile géologique (litho stratigraphique) définie au préalable (Illustration 22).

### 6.8.2. Codage des données

Une formation est modélisée par deux variables : côte du toit (couche en *onlap*) ou du mur (couche en *erode*) de la couche modélisée. Les données intégrées à la modélisation contiennent une information (valeurs) sur ces variables. Un codage des données est alors effectué pour identifier et initier ces variables.

### 6.8.3. Mise en cohérence des données

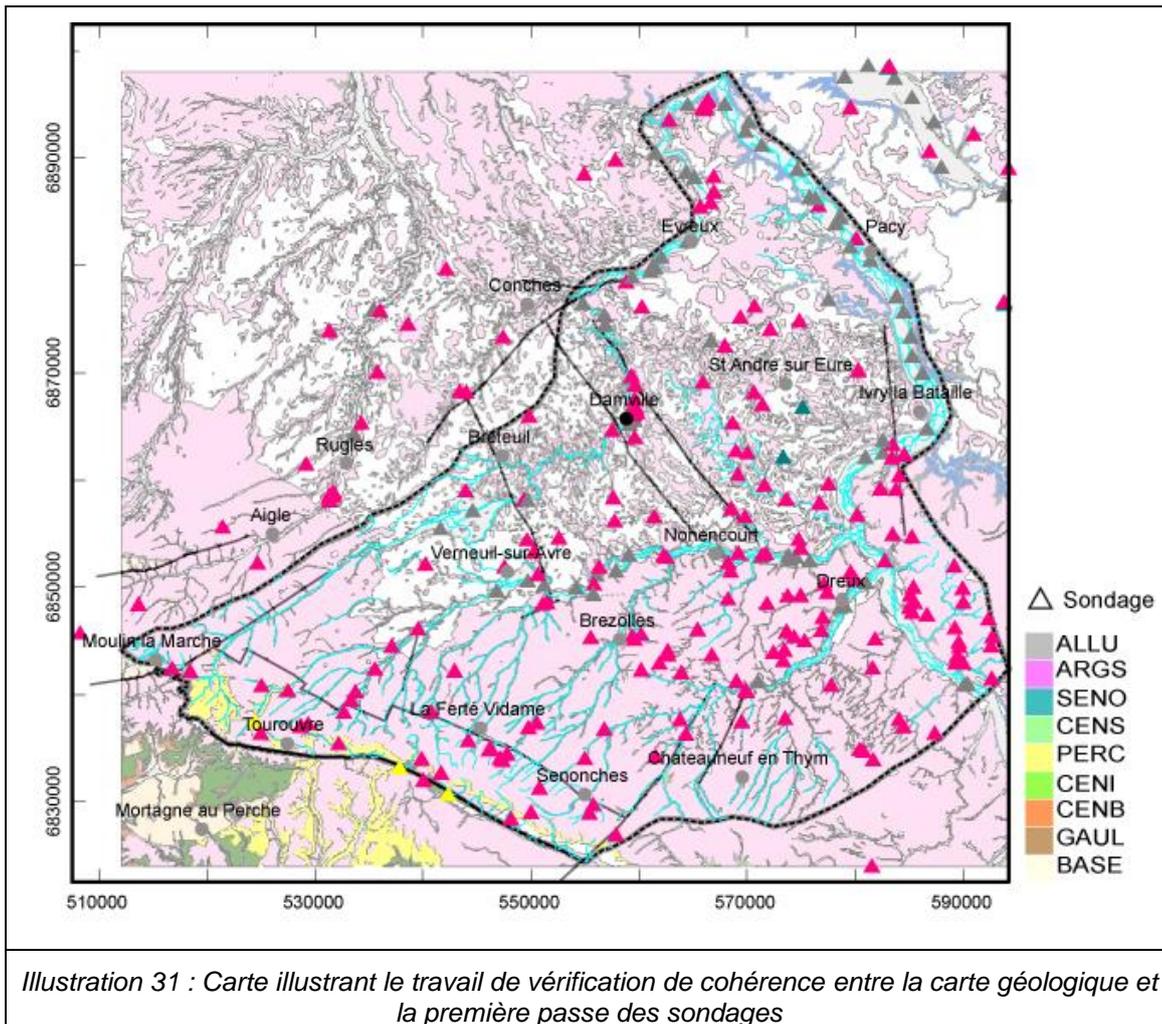
Par la suite, un ensemble de tests sur la cohérence des données (codées) est effectué pour détecter éventuellement des incohérences et anomalies.

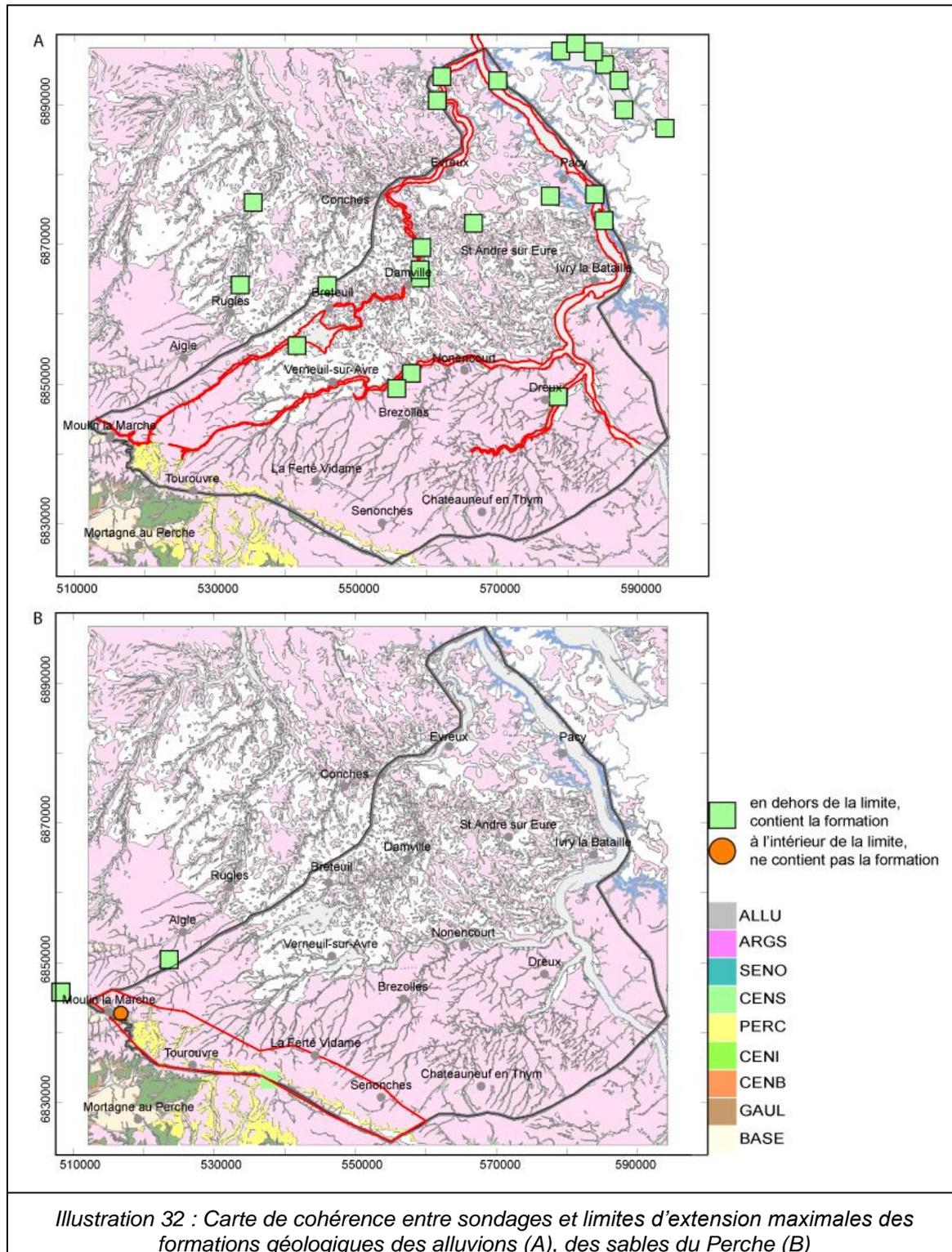
Par exemple, la cohérence entre les données de la carte géologique et des sondages est testée : la formation à l'affleurement indiquée dans le forage doit correspondre à celle figurant sur la carte géologique (Illustration 31).

Les polygones et les polylignes issus de la carte géologique ne sont donc pas pris en compte dans l'interpolation des données. Toutefois, les points de contraintes imposés par la carte géologique sont conservés (cf. § 6.8.5, page 75).

De la même façon, la cohérence entre les données de sondages et la limite des emprises est contrôlée :

- pour les alluvions, un certain nombre de données se trouve en dehors de l'emprise définie dans le modèle pour les alluvions. Ceci est dû au fait que : (1) uniquement les alluvions récentes sont considérés alors que dans certaines descriptions du forage les terrasses anciennes sont décrites comme des alluvions, (2) les colluvions ne sont pas prises en considération, parfois décrites comme des alluvions par le foreur (cf. Illustration 32 A).
- Pour les sables du Perche : deux données se trouvent à l'extérieur de l'emprise du modèle et un forage n'indique pas de passe de PERC à l'ouest de la faille de Courtomer dans l'emprise (cf. Illustration 32 B).





#### 6.8.4. Méthode d'interpolation

La géométrie des différentes couches définie par la pile géologique est générée au travers du calcul des variables (côte toit ou mur) aux interfaces suivantes : mur des alluvions modernes, mur des argiles à silex et toit des formations identifiées dans la pile stratigraphique en dépôt :

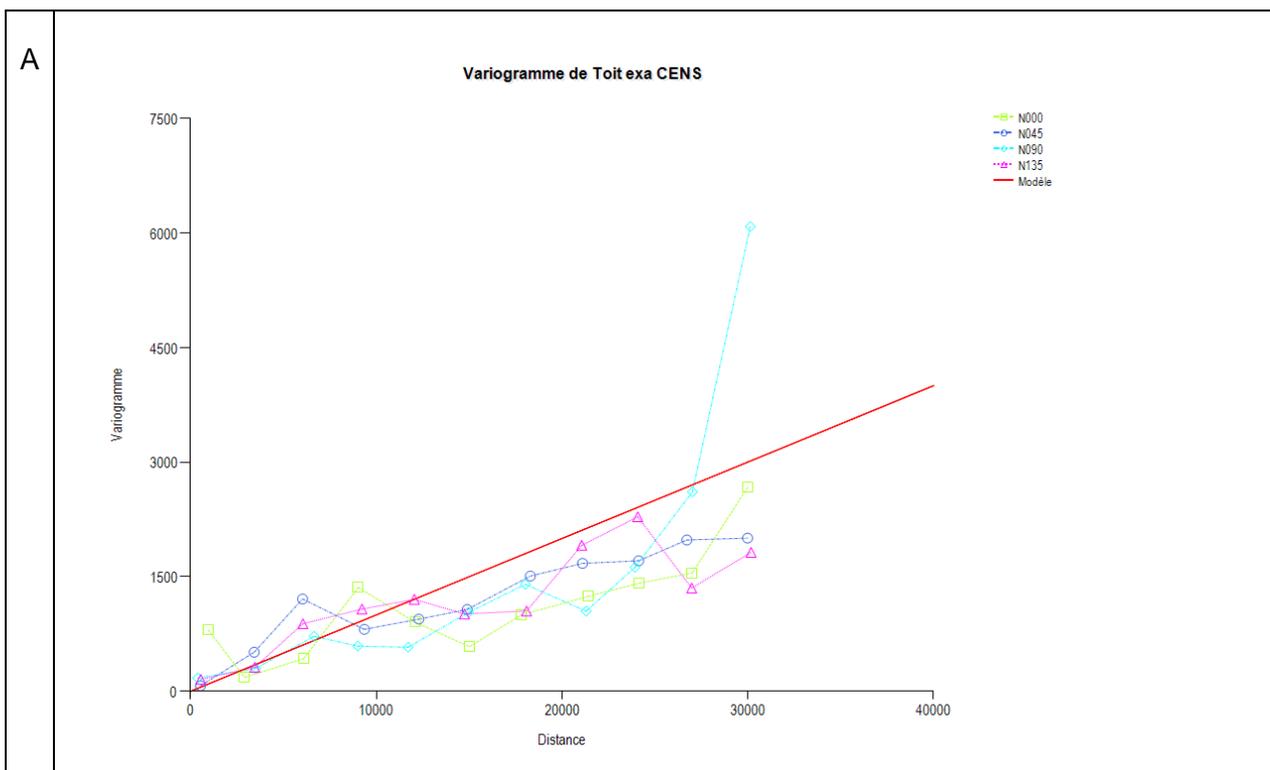
SENOnien, CENomanien Supérieur, sables du PERChe, CENomanien Inférieur, CENomanien Basal, GAULT et toit de la BASE.

Le calcul s'effectue par krigeage linéaire sans dérive sur les données codées (cf. § 6.8.2., page 71). Cette méthode permet de prendre en compte les informations disponibles spatialement selon une approche géostatistique qui se base sur le voisinage des différents ouvrages pour lesquels des informations sont disponibles.

Afin de valider la méthode d'interpolation choisie, une analyse géostatistique du toit de la formation CENS a été effectuée. Un modèle de variogramme est défini (Illustration 33). D'après la distribution des données, le modèle de variogramme le plus adapté est linéaire sans dérive.

La définition de ce modèle permet pour cette surface, d'obtenir une carte d'écart type de l'interpolation qui donne une indication sur l'erreur de l'interpolation (Illustration 44 C).

Les paramètres de voisinage pour l'interpolation appliqués pour l'ensemble des formations sont les suivants : un voisinage glissant rectangulaire (100000x100000) avec un nombre maximum de points présélectionnés de 500 à 1000 suivant les formations et un nombre maximum de points du voisinage de 30. La distance de fusion est limitée à une distance de 5 m.



**B**

Définition du modèle de variogramme

Effet de pépite : 0

N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie	Direction d'anisotropie (PSI) / Nord	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI+90)	Exposant
1	Linéaire	1	0.1	Isotropique			
2	<None>			Isotropique			
3	<None>			Isotropique			
4	<None>			Isotropique			

Nom du fichier modèle chargé : D:\Documents\Voiselet\Travail\Projet\Bassin\_Avre\AVRE\_2013\MODELE\GDM\t\_...  
Nom du modèle : t\_cens

OK  
Annuler  
Aperçu  
Charger modèle...  
Enregistrer sous modèle...  
Enregistrer modèle...  
Effacer modèle...

*Illustration 33 : Analyse géostatistique du toit de la formation CENomanien Supérieur (CENS)*

*(A) Variogramme des données selon différentes directions préférentielles (en couleur) et modèle de variogramme (en rouge) ; (B) tableau récapitulatif de la définition du modèle de variogramme le plus adapté à la distribution des données (modèle linéaire sans dérive)*

### 6.8.5. Construction du modèle et gestion des inégalités

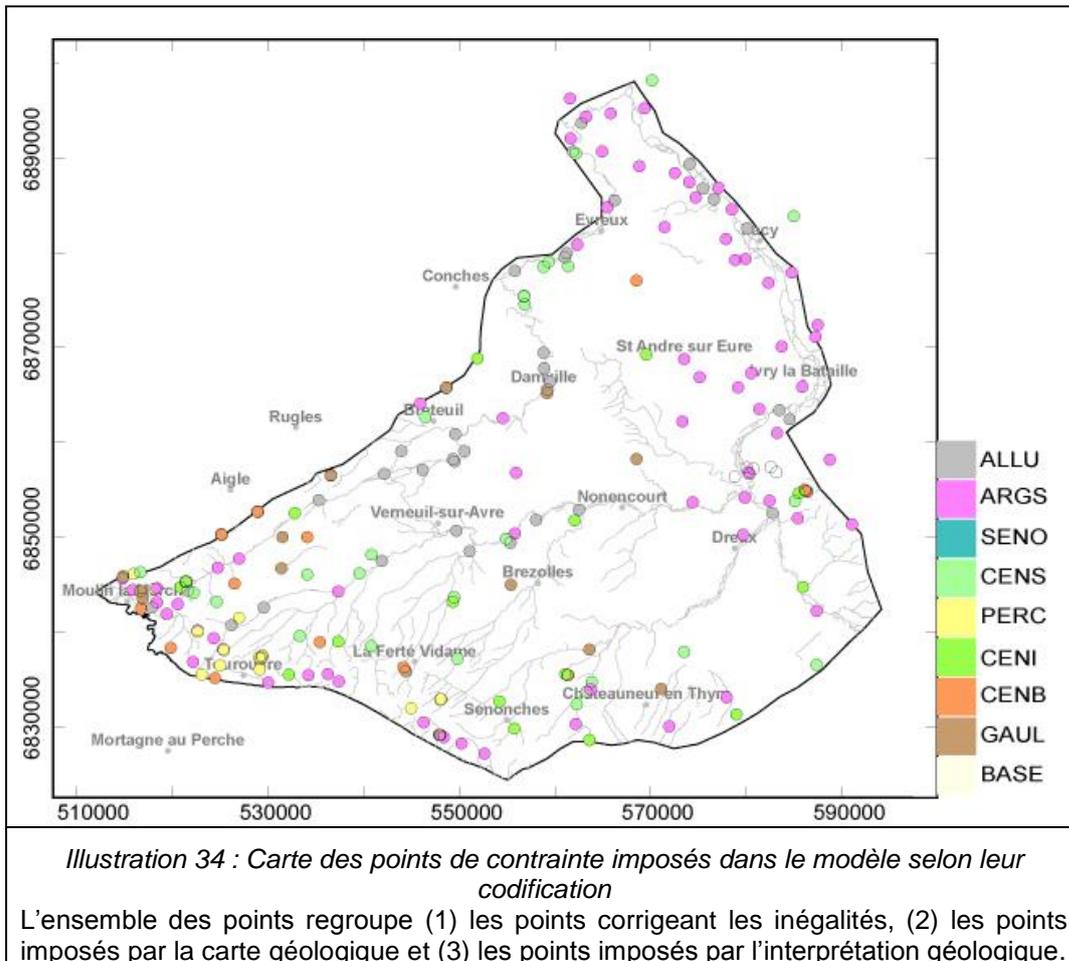
Le modèle est construit selon le processus itératif suivant : les données « exactes » où le toit et/ou le mur d'une formation ont été reconnus (forages, contacts géologiques, coupes interprétées, ...). A partir de ces données exactes, l'interpolation est réalisée au droit de chaque point et sur une grille définie au préalable (cf. § 6.8.1, page 71).

La grille (surface) obtenue est « brute », c'est-à-dire que les surfaces modélisées sont indépendantes les unes des autres : le découpage des surfaces dû à l'intersection des différentes surfaces combinées n'est pas pris en compte dans cette étape.

#### **Contrôle d'inégalité et points de contraintes**

Cette première interpolation est comparée aux données d'inégalités pour vérifier si les contraintes d'inégalité sont respectées : si un forage n'a pas atteint la base d'une formation, on ne connaît pas la cote du substratum de cette formation ; par contre, on sait que cette cote est inférieure à la cote de la base du forage : on dispose ainsi d'une « contrainte d'inégalité ». Lorsque qu'une inégalité n'est pas respectée, après vérification qu'il ne s'agit pas d'erreur dans les données (erreur de localisation, de saisie, d'interprétation...), des points de contrainte sont imposés de façon à respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations. Ce travail se fait à partir de l'expertise des géologues et de visualisations en plan et en coupe sur lesquelles sont reportés les éléments connus : logs des forages, épaisseurs et cote des formations, coupes interpolées. Le travail se fait ainsi pas à pas, interface par interface.

Une fois toutes les contraintes d'inégalités respectées, les différentes surfaces modélisées sont combinées automatiquement entre elles en fonction de leur caractère « érosif » ou « déposant ». Cette combinaison permet d'obtenir un modèle multicouche cohérent. Des points de contrainte complémentaires peuvent être introduits si nécessaire notamment dans les zones dépourvues de données et où le modèle présente des anomalies résiduelles.



L'ensemble du modèle est ensuite contrôlé par l'intermédiaire de cartes d'isohypses et d'isopaques et par le tracé de coupes sériées ainsi que de vues 3D. Ces résultats permettent de vérifier la cohérence de l'ensemble.

### **Hypothèses complémentaires de construction**

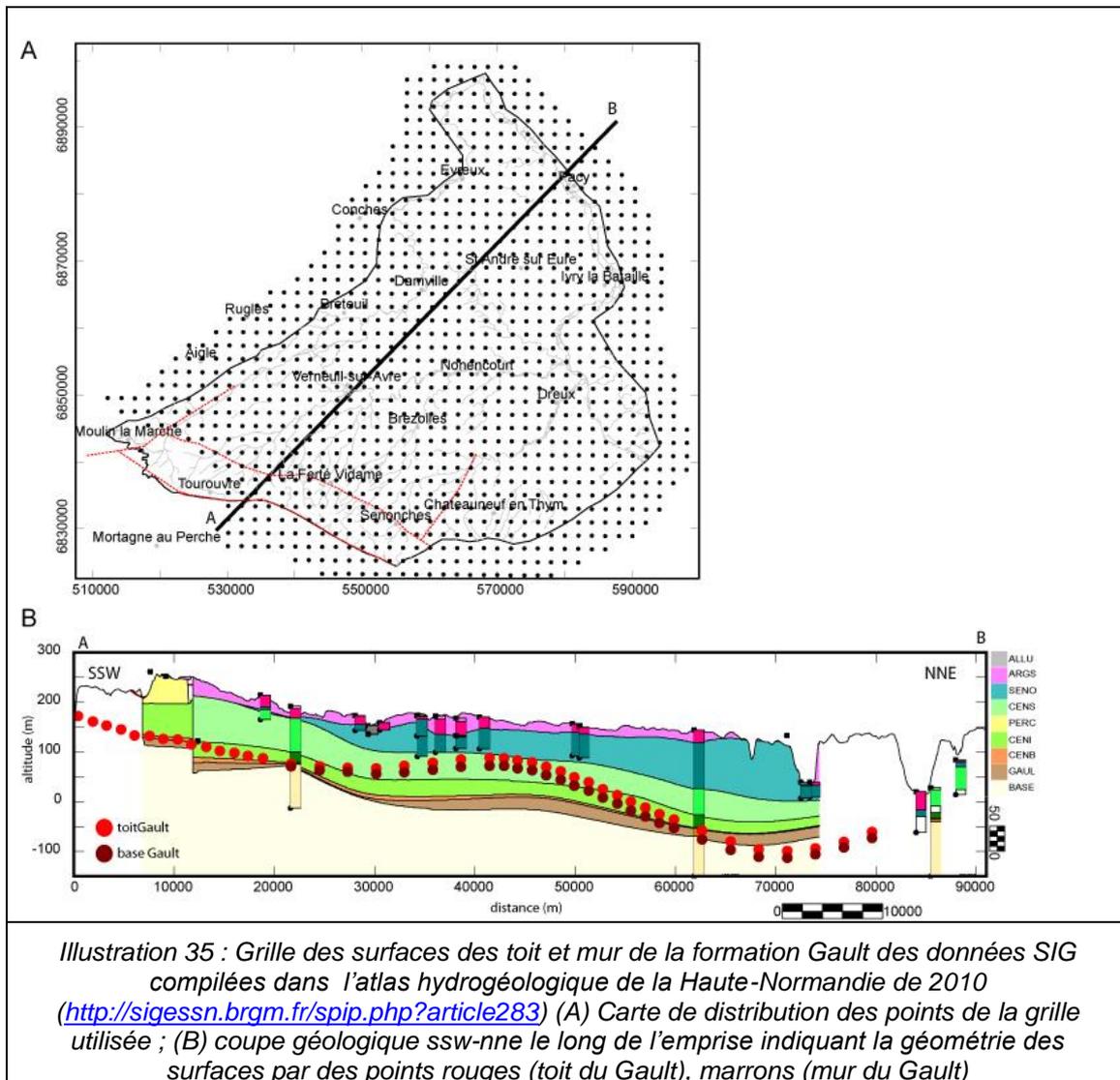
- **Formations profondes**

Les formations les plus profondes (Gault, cénonanien basal) ne sont traversées que par un petit nombre de forages (22 environ). Par exemple, le centre du bassin est très peu représenté (Annexe 2 et 2 cartes des formations profondes). Il y a donc nécessité d'extrapoler les informations géométriques disponibles pour les formations les plus profondes. L'intégration de points de contrainte supplémentaires (ajout de forages fictifs) ou par l'ajout de passes profondes complémentaires sur des forages existants (passes fictives) permettent de contraindre la géométrie de l'interface modélisée.

- Pour la formation CENB, une épaisseur minimum de 5 m est imposée par des points de contraintes.

- Les interfaces Base et toit de la formation de GAULT manquent de données pour leur interpolation. Des points de contraintes ont été imposés en utilisant des grilles d'altitude

(isohypses) de ces interfaces issues des données SIG compilées dans l'atlas hydrogéologique de la Haute-Normandie de 2010 (<http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article283>) : ces grilles 2D ont une dimension de maille carrée de 2000 m, soit 10 fois plus grande que celle du modèle de l'Avre, ne permettant pas une résolution identique de la géométrie des interfaces entre les deux modèles. Par conséquent, nous remarquons que les données de la grille de l'atlas de Haute-Normandie (<http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article283>) coïncident avec les forages présents au Sud et au Nord de l'emprise (forages utilisés pour la construction de ce modèle) (cf. Illustration 35). Cependant au centre du modèle la grille importée prédit des altitudes trop élevées par rapport aux données de sondages et à l'interpolation des autres couches du modèle de l'Avre. Seules les données cohérentes aux données de forages ont donc été prises en compte.



• Formation CENS/SENO

De nombreux forages < 50m possèdent une description de passe ne permettant pas de repérer facilement l'interface Turonien inférieur / Turonien moyen. La validation de cette limite par le géologue référent a été nécessaire.

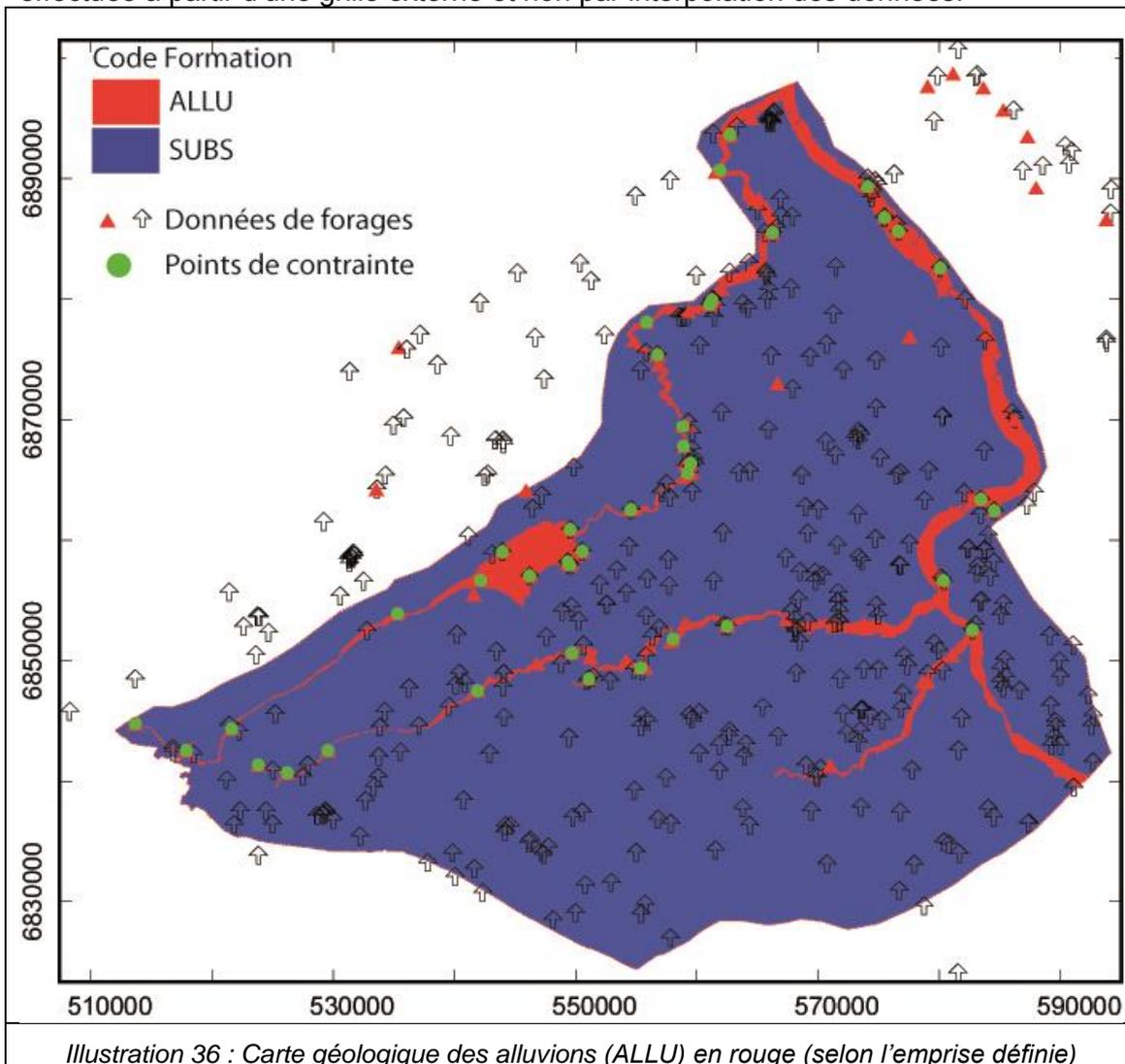
- **Formation argiles à silex**

Certains forages décrivent des « poches » d'argile à silex, résultats de remplissage de cavités karstiques (craie karstifiée). Des points de contrainte ont été entrés pour modéliser ces structures qui présentent un intérêt hydrologique.

- **Formation des alluvions**

Une modélisation de la formation ALLUvions a été effectuée afin d'imposer 1 m d'épaisseur d'alluvions sur les mailles de l'emprise des Alluvions là où l'épaisseur est inférieure à 1 m. Ceci permet d'avoir un remplissage de l'ensemble des mailles de l'emprise. Pour ce faire, en addition des données de forages et de points de contrainte imposés pour cette formation, une carte géologique des alluvions a été définie. Au polygone, dont la limite définit l'emprise des alluvions, il est imposé à l'intérieur le code formation alluvions ALLU et à l'extérieur celui du substratum (SUBS). Cette carte impose que la formation ALLUvions affleure en surface. Par conséquent, lors de la construction du modèle, l'intersection du toit de cette formation avec la surface de la topographie impose au moins 1 m d'alluvions dans l'emprise de la formation.

La grille obtenue est ensuite utilisée dans la construction du modèle géologique. Pour ce faire, dans la méthode de modélisation, il est précisé que la construction de la couche ALLU est effectuée à partir d'une grille externe et non par interpolation des données.



### 6.8.6. Combinaison des surfaces

La combinaison des surfaces consiste à découper/recouper les surfaces « brutes » selon la logique de dépôt (*onlap* ou *erode*), définie au préalable dans la pile litho stratigraphique pour obtenir une grille finale (modèle finale).

Les surfaces en érosion sont d'abord assemblées (la plus récente venant éroder la plus ancienne). Ensuite, les surfaces en dépôt (*onlap*), se trouvant entre deux surfaces d'érosion sont combinées de l'unité la plus ancienne à l'unité la plus récente. La condition est qu'une surface ne peut se déposer que s'il reste suffisamment de place (la côte du toit de la formation doit être supérieure aux côtes des toits ou murs des formations déjà en place).

### 6.8.7. Compléments au modèle

La craie karstifiée constitue une couche à propriétés hydrodynamiques jouant un rôle essentiel dans la circulation des fluides au sein du bassin. Cette couche est nécessaire à la construction du modèle hydrodynamique.

Pour modéliser cette couche altérée qui comprend les formations crayeuses affleurentes ou sous-jacentes aux argiles à silex / alluvions, deux caissons sont ajoutés à la pile litho stratigraphique d'origine (Illustration 37) : SENA pour la couche altérée correspondant à la craie au nord de la faille de Senonches (craie sénonienne ou craie Cénomaniens supérieur si une lacune de la craie sénonienne existe) et CENA pour la craie du Cénomaniens inférieur se trouvant sous les sables du Perche au Sud de la faille de Senonches. Ces deux formations sont érosives.

Ces couches sont modélisées par leur épaisseur à partir du toit de chaque couche de craie (SENO/CENS ou CENI).

L'épaisseur de CENA est imposée par des points de passage. Cette formation est présente uniquement dans l'axe de Senonches, compartiment surélevé mettant les sables du Perches (couche perméable) à l'affleurement ou sous-jacente aux argiles à silex et permettant ainsi, par migration des fluides, l'altération de la craie du cénomaniens inférieur.

L'épaisseur de SENA est obtenue à partir d'une grille d'épaisseur créée à partir d'un polygone défini le long des vallées. A l'intérieur de ce polygone, l'épaisseur de craie altérée est de 30 m, et en dehors, sur les plateaux, d'une épaisseur de 15 m. Les valeurs de cette grille sont, par la suite, lissées par l'application de la méthode d'interpolation par moyenne mobile (rayon d'influence de 500 m).

La méthode de modélisation utilise : (1) les grilles du modèle géologique initial, (2) la grille obtenue pour l'épaisseur de SENA et (3) interpole les données codées pour la formation CENA. Les grilles et la surface CENA obtenue par interpolation sont combinées pour fournir le modèle géologique avec couche *altérée introduite*, présenté ci-dessous.

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
ALLU		ALLUvions		F11
ARGS	EROD	ARGiles à Silex	B11	F10
SENA	EROD	SENonien Altéré	B10	F09
SENO	EROD	SENonien	B09	F08
CENS		CENomanien Superieur	T07	F07
PERC		Sable de PERChe	T06	F06
CENA	EROD	CENomanien inférieur Altéré	T05	F05
CENI	EROD	CENomanien Inferieur	B05	F04
CENB		CENomanien Basal	T03	F03
GAUL		GAULt	T02	F02
BASE	EROD	BASE	B02	F01

Illustration 37 : Pile géologique du modèle avec les formations de craies altérées. SENa et CENa intercalées respectivement entre les ARGiles à Silex et le SENOnien et les sables du PERChe et le CENomanien Inferieur.

Méthode personnalisée. Etape 3/3 : Sélection du mode de calcul des variables à modéliser

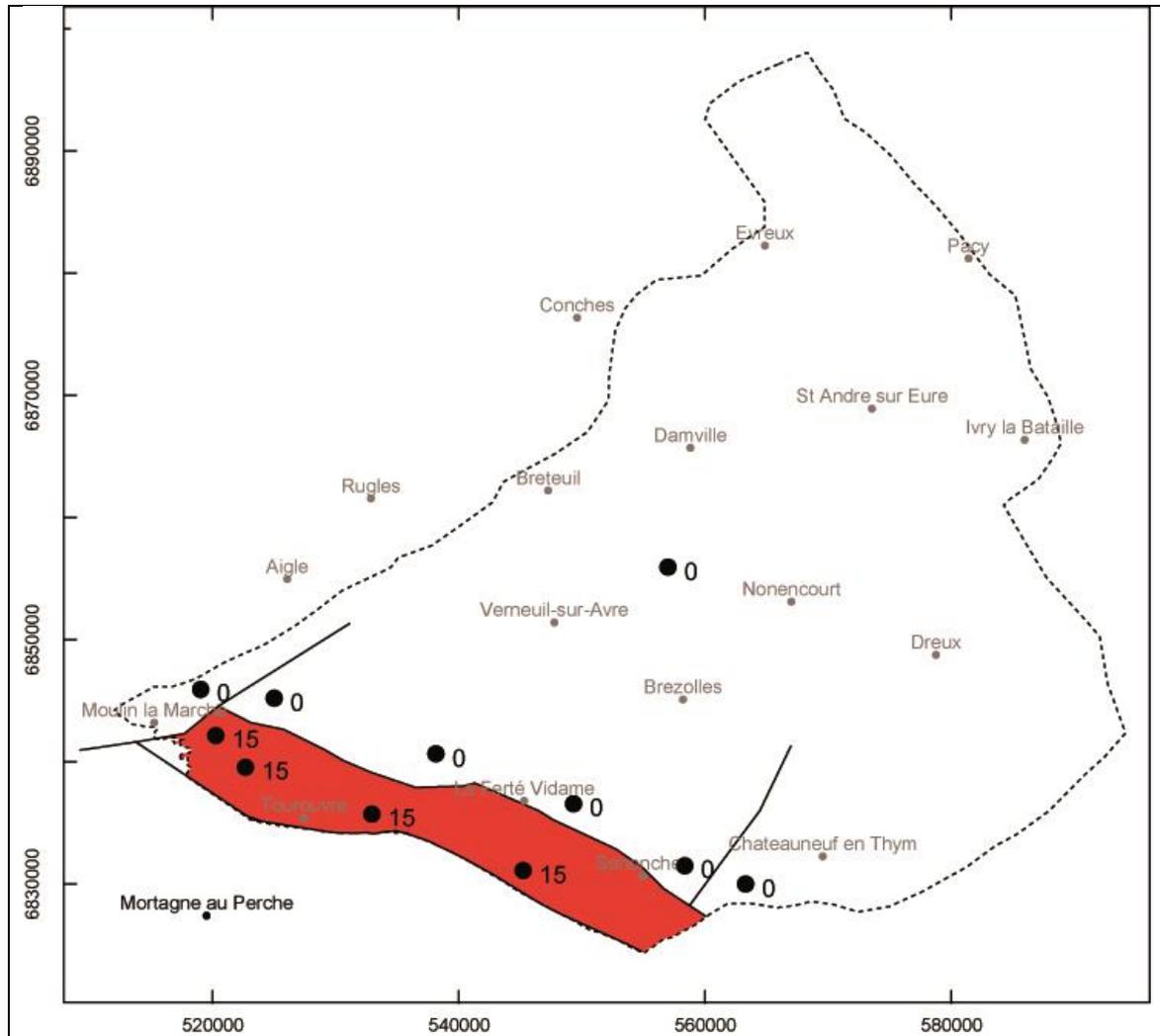
Variables du modèle :

- [TOP] (obligatoire)
- [H11] Epaisseur ALLU
- [B11] Epaisseur ARGs Base de : ALLU (EROD)
- [H10] Epaisseur ARGs
- [B10] Epaisseur SENa Base de : ARGs (EROD)
- [H09] Epaisseur SENa
- [B09] Epaisseur SENo Base de : SENa (EROD)
- [H08] Epaisseur SENo
- [T07] Epaisseur CENS Toit de : CENS
- [H07] Epaisseur CENS
- [T06] Epaisseur PERC Toit de : PERC
- [H06] Epaisseur PERC
- [T05] Epaisseur CENa Toit de : CENa
- [H05] Epaisseur CENa
- [B05] Epaisseur CENi Base de : CENa (EROD)
- [H04] Epaisseur CENi
- [T03] Epaisseur CENb Toit de : CENb
- [H03] Epaisseur CENb
- [T02] Epaisseur GAUL Toit de : GAUL
- [H02] Epaisseur GAUL
- [B02] Epaisseur BASE Base de : GAUL (EROD)

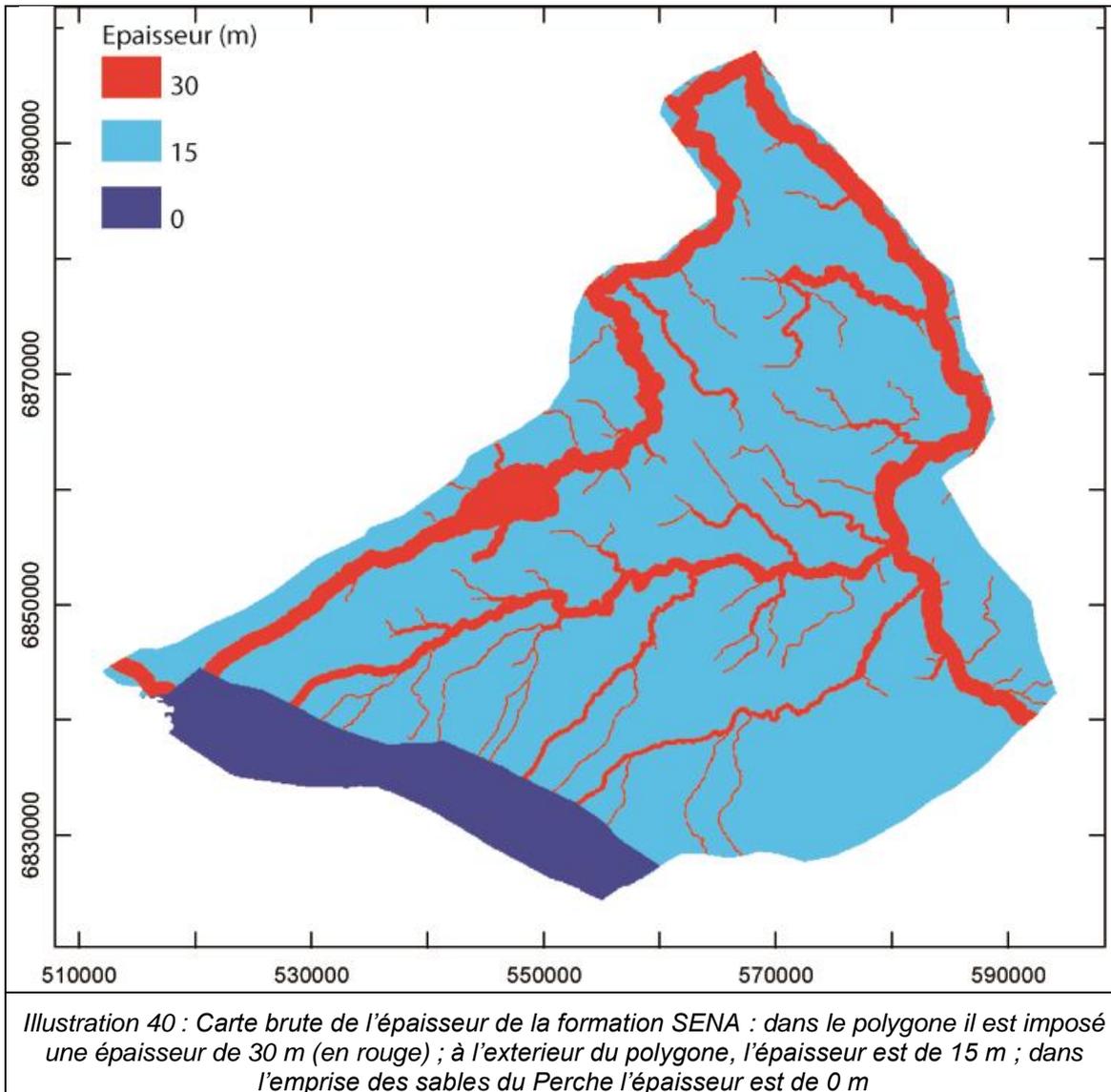
Mode de calcul (double-clic pour modifier) :

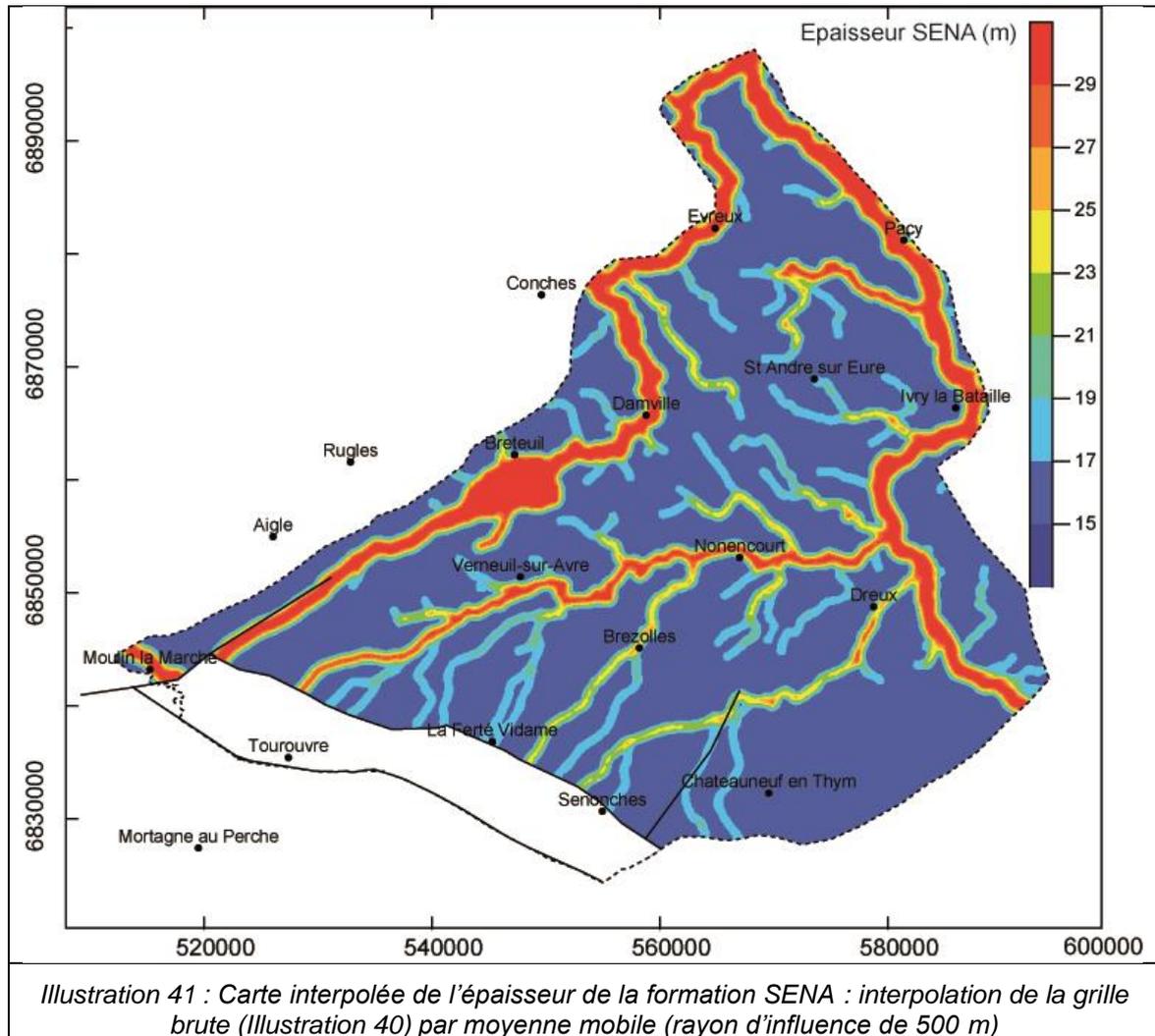
- [TOP] = variable : [V001] de la grille : mnt\_avre\_v5\_100m  
-> épaisseur déduite : H11 = TOP - B11
- [B11] = variable : [PB09] de la grille : Modèle Final\_100m  
-> épaisseur déduite : H10 = B11 - B10
- [B10] = variable : [PB08] de la grille : Modèle Final\_100m  
[H09] = variable : [EPA] de la grille : Grille 2D EPA liss  
-> interface calculée à partir de B10 - épaisseurs  
-> épaisseur déduite des autres
- [T07] = variable : [PT06] de la grille : Modèle Final\_100m  
-> épaisseur déduite : H07 = T07 - T06
- [T06] = variable : [PT05] de la grille : Modèle Final\_100m  
-> épaisseur déduite : H06 = T06 - T05
- [T05] = variable : [PT04] de la grille : Modèle Final\_100m  
[H05] = interpolation directe dans MultiLayer  
-> interface calculée à partir de T05 - épaisseurs  
-> épaisseur déduite des autres
- [T03] = variable : [PT03] de la grille : Modèle Final\_100m  
-> épaisseur déduite : H03 = T03 - T02
- [T02] = variable : [PT02] de la grille : Modèle Final\_100m  
-> épaisseur déduite : H02 = T02 - B02
- [B02] = variable : [PB02] de la grille : Modèle Final\_100m

Illustration 38 : Principe de la méthode de modélisation appliquée pour la construction du modèle géologique avec prise en compte des formations de craies altérées.



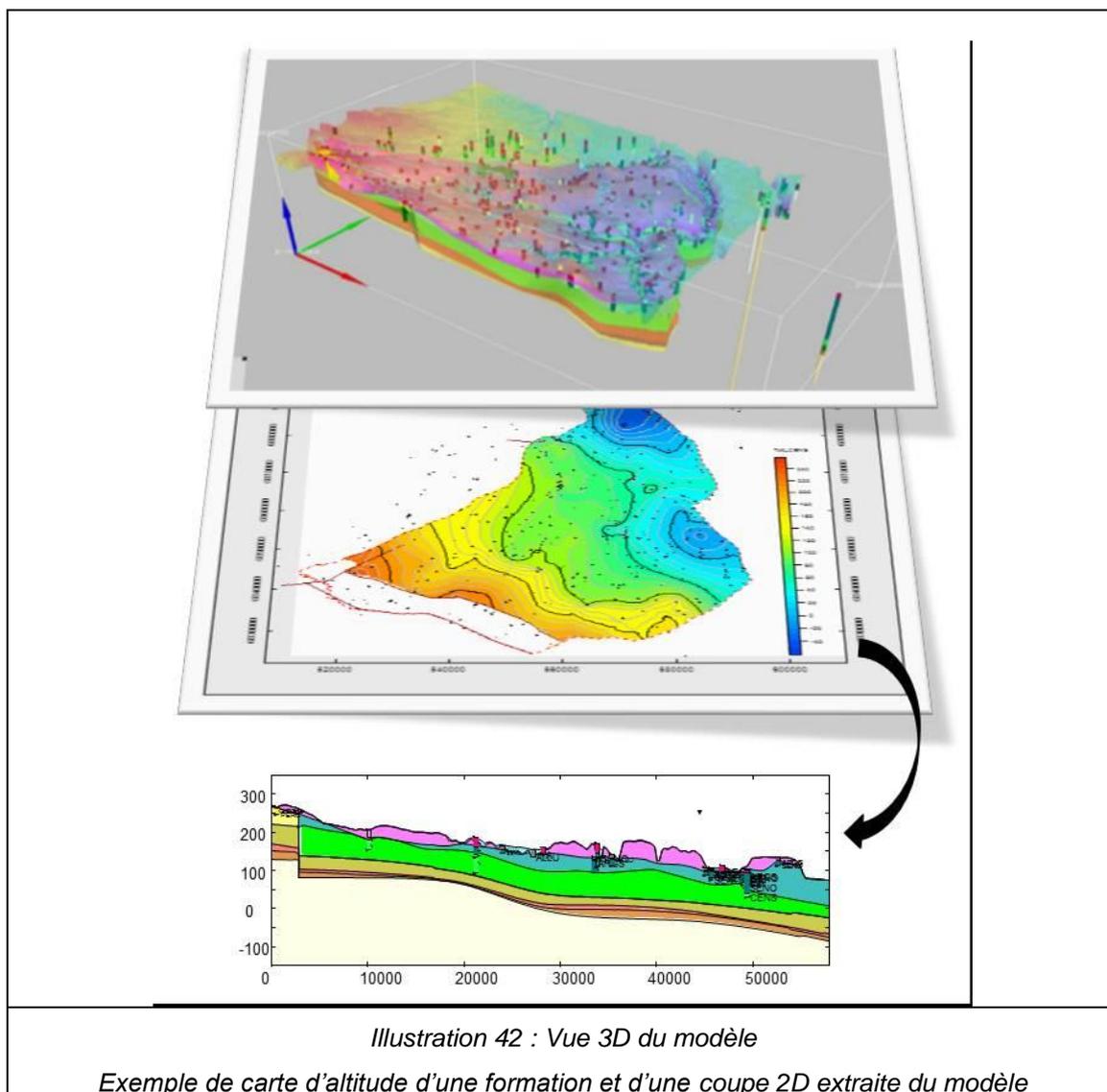
*Illustration 39 : Carte de l'épaisseur de la formation CENA interpolée à partir des points de passage imposés (rond noir) : valeurs associées à ces points sont de 15 m dans l'axe de Senonches, 0 m au Nord de la faille de Senonches.*





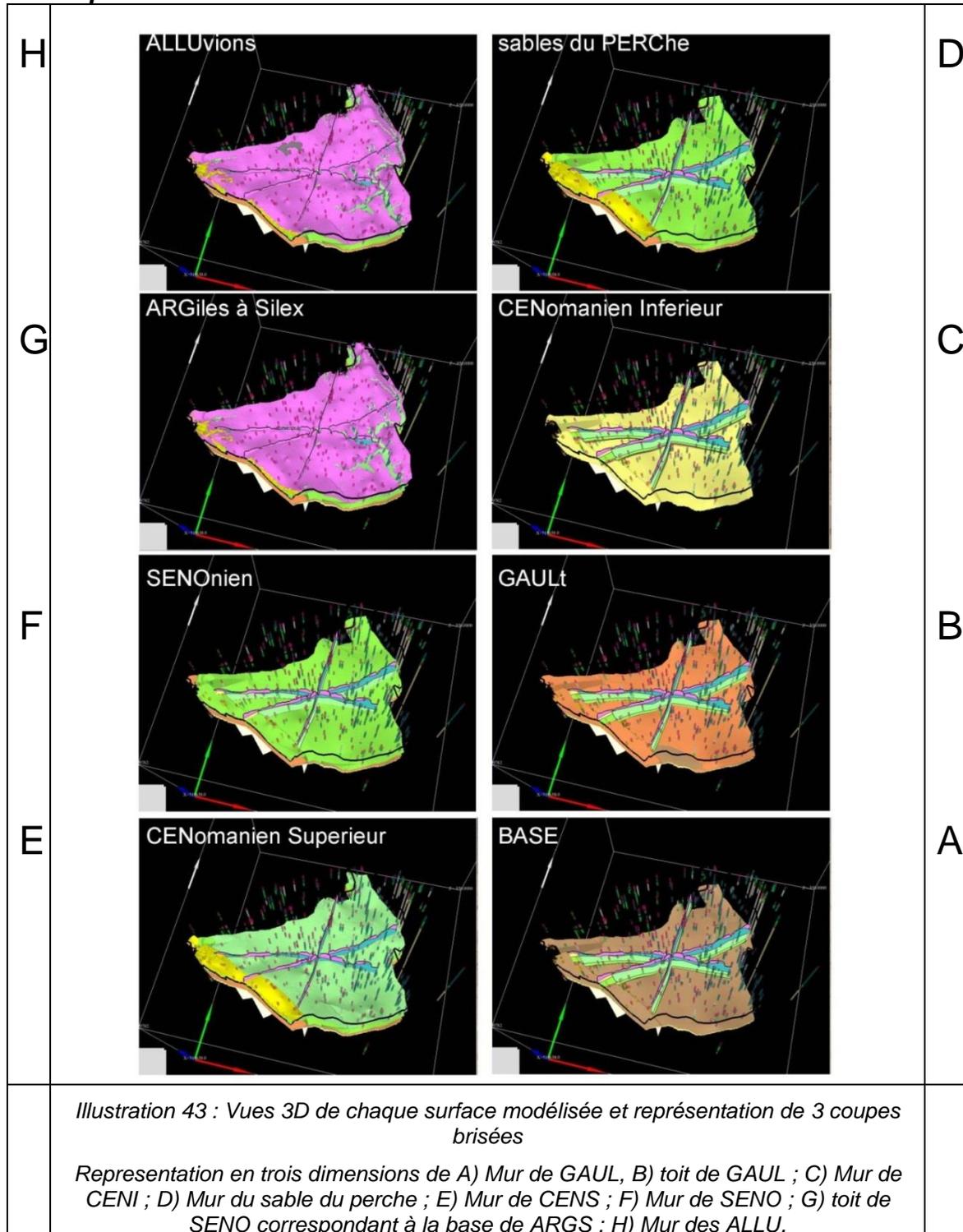
## 6.9. RESULTATS DU MODELE

Le modèle géologique donne une information sur la géométrie des structures du bassin en trois dimensions. Il en est extrait (Illustration 42) une visualisation 3D des structures avec superposition des données interpolées et des coupes géologiques 2D. Des grilles 2D des altitudes des surfaces modélisées et des épaisseurs des couches sont calculées. Il est aussi possible de fournir des profils prédictifs 1D sur l'ensemble de l'emprise et des calculs de volume des formations modélisées.



6.9.1. Exemple de documents graphiques

*Exemple de vues 3D du modèle du bassin de l'Avre*

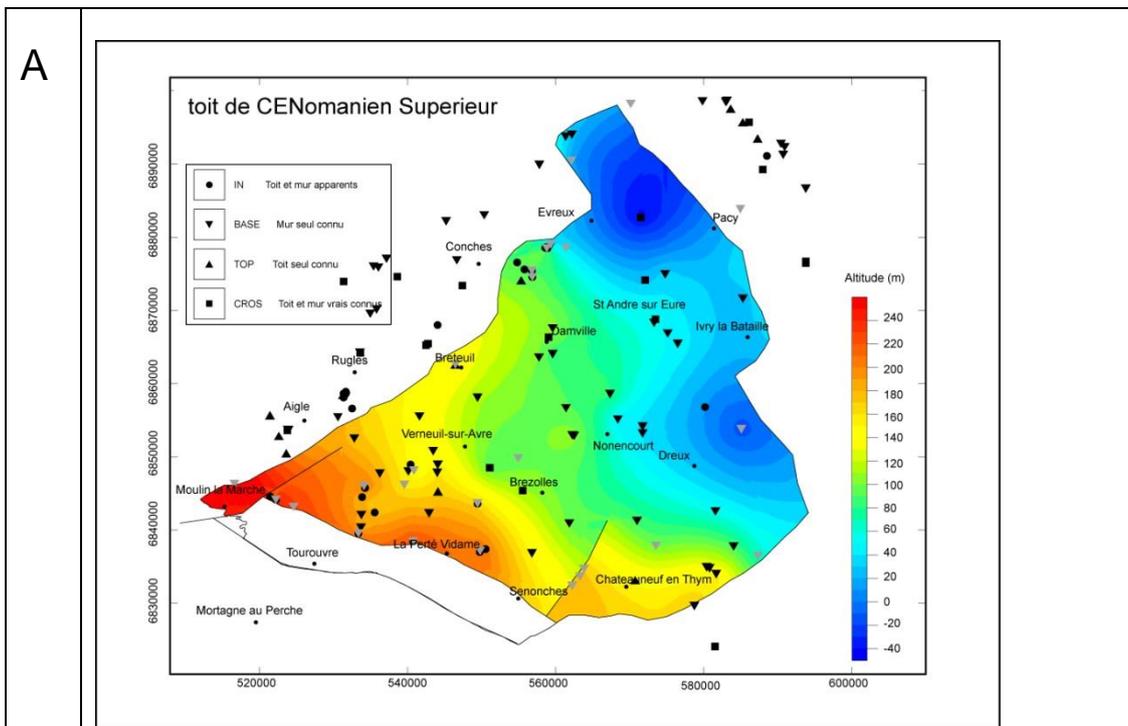


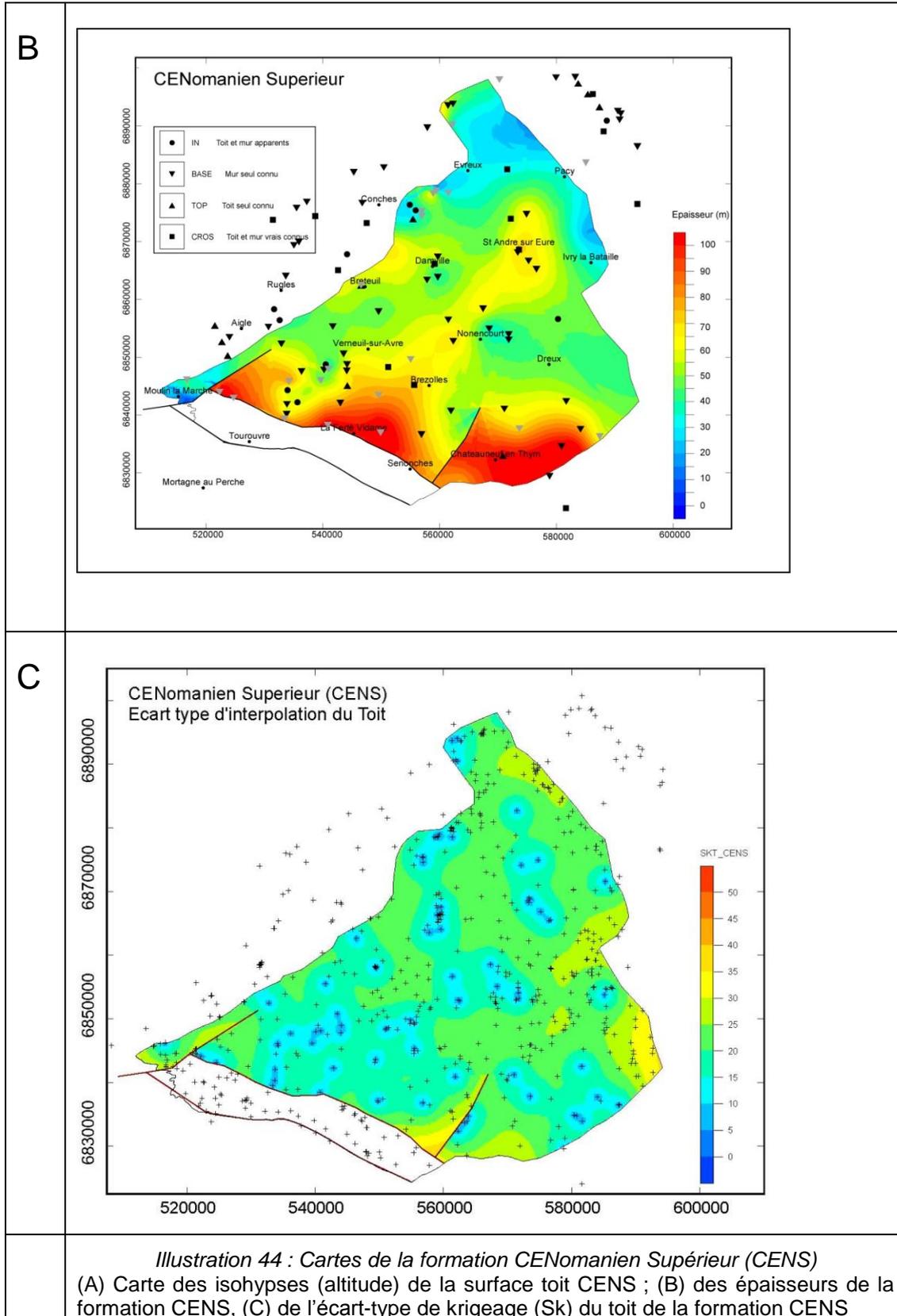
**Exemple de cartes d'altitude et d'épaisseur de la formation CENS (Illustration 44).**

Les cartes d'altitude et d'épaisseur des différentes formations sont présentées en Annexes 2 et 3. A titre d'exemple, les Illustration 44 A et B présentent une carte de l'altitude du toit et une carte d'épaisseur de la formation Cénomaniens supérieur (CENS).

Une carte d'écart type de l'interpolation du toit de la formation CENS (écart-type d'estimation  $\sigma_k$ ) est montrée Illustration 44 C pour indiquer la fiabilité du modèle pour cette surface. Cette surface ayant été estimée par un modèle géostatistique (cf. paragraphe 6.8.4), il est possible, par la méthode de validation croisée de ré-estimer chaque point connu  $Z(x)$  à partir des voisins, en faisant comme si le point lui-même n'était pas connu. En chaque point de donnée, on dispose donc de trois valeurs : (1) la valeur vraie ( $Z(x)$ ) ; (2) la valeur estimée (interpolée) à partir des points voisins ( $Z^*(x)$ ) et (3) l'écart-type d'estimation ( $\sigma_k(x)$ ). Ce dernier paramètre est une mesure de dispersion du résultat de l'interpolation de la variable et permet ainsi d'identifier les zones mal estimées.

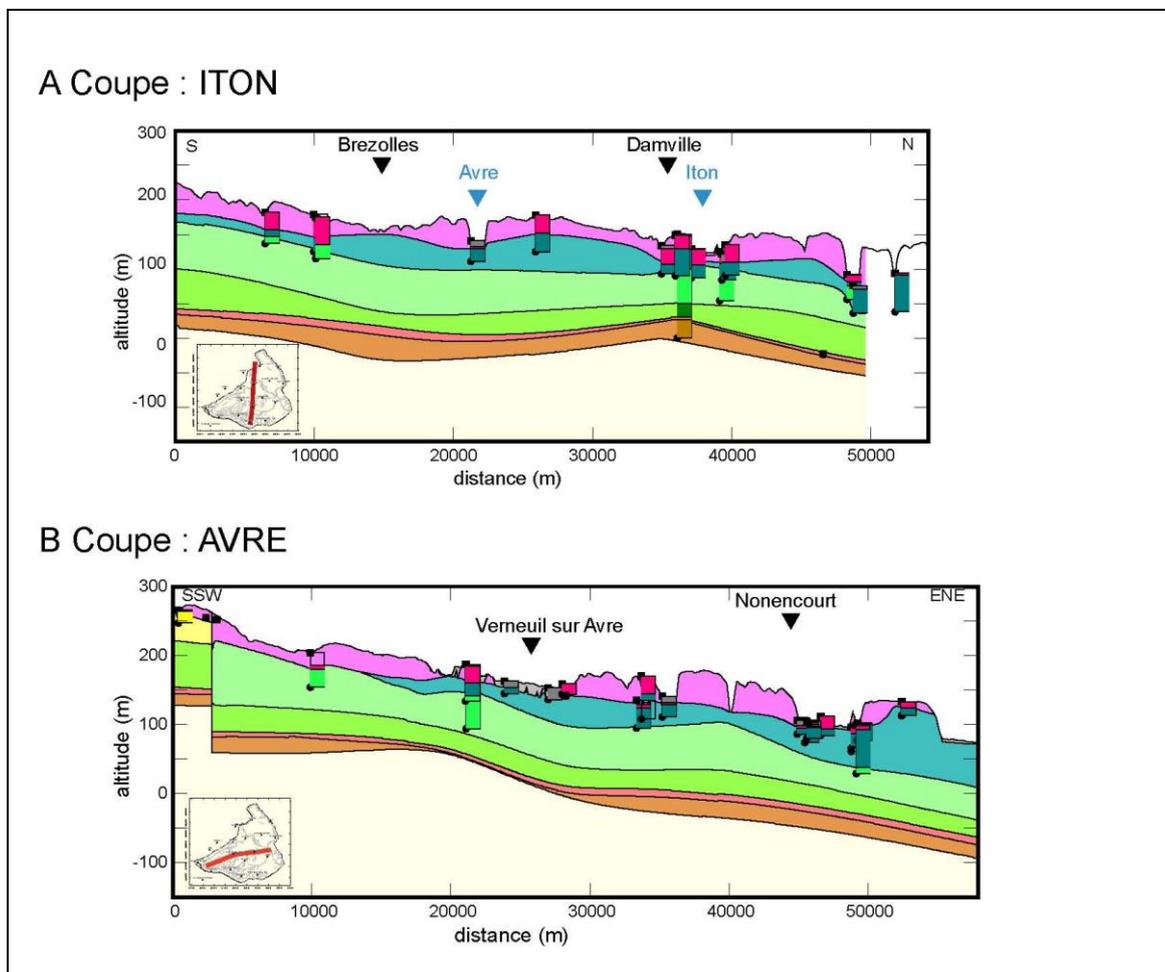
Il est noté que le long des vallées d'Iton et de l'Avre et le long d'un axe de direction SW-NE, l'interpolation présente un faible écart-type. L'interpolation de cette surface dans ce secteur est à priori fiable. Au contraire, le long des failles de Courtomer et à l'ouest de la faille du demi-dôme de Thymerais ; ainsi que le long de la vallée de l'Eure, la carte indique un écart type plus élevé, évoquant une fiabilité de l'interpolation moindre. Il est logiquement remarqué que l'écart type est fonction de la distribution spatiale des données interpolées : plus la concentration de données (forages ou points de contrainte imposés) est importante, plus l'écart type est faible.

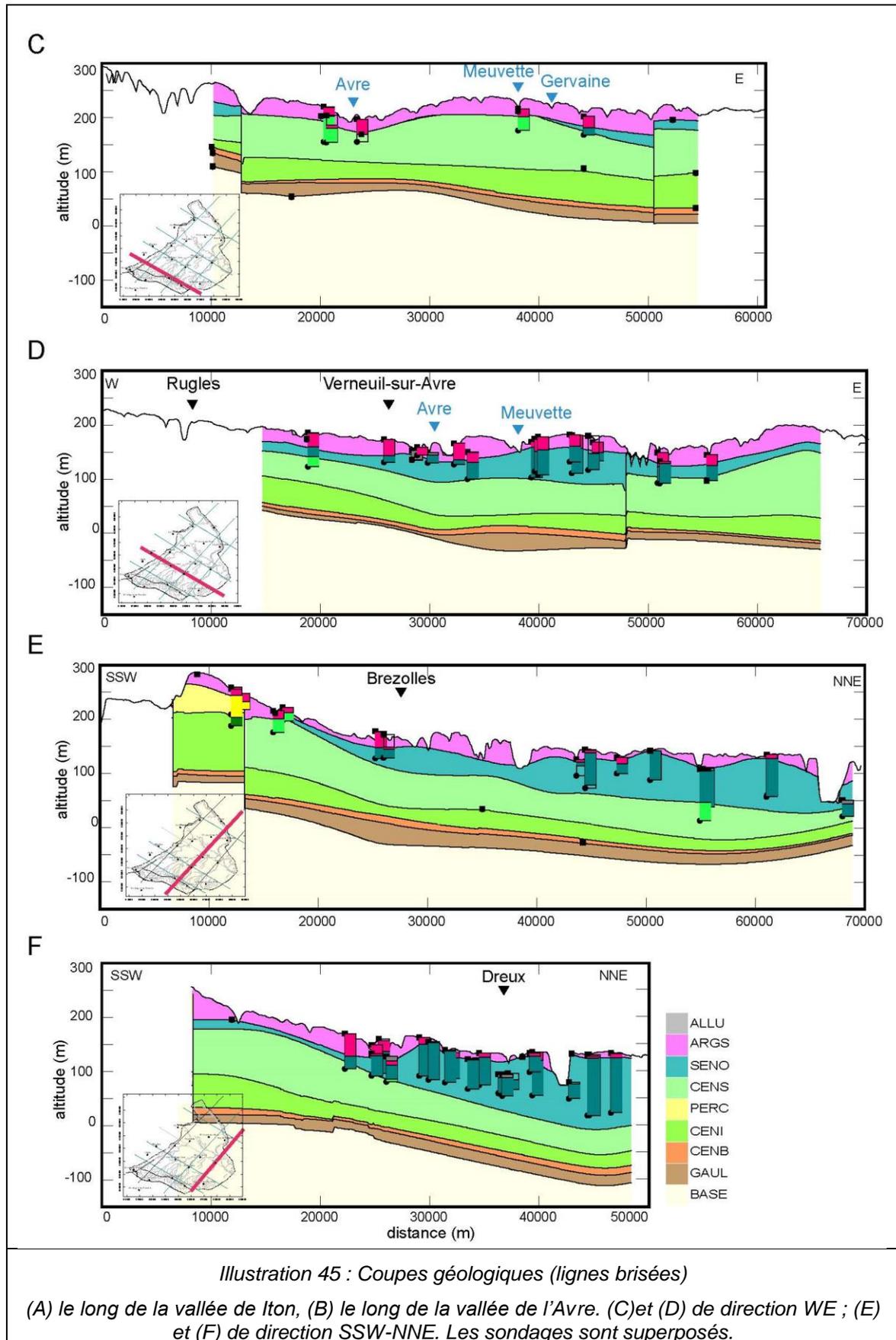




### Exemple de coupes 2D extraites du modèle

De nombreuses coupes verticales ont été réalisées. La localisation de ces coupes est visible dans le petit encart en bas à gauche de chaque coupe ainsi que sur une carte de localisation présentée en Annexe 4.





Coupe	Coord X (m) (L93)		Coord Y (m) (L93)	
<b>AVRE</b>	X1	524618.50	Y1	6840861.00
	X2	580347.63	Y4	6854793.00
<b>ITON</b>	X1	556105.50	Y1	6830411.50
	X2	560060.00	Y4	6884420.00
<b>SSW-NNE</b> 15	X1	554380	Y1	6881974.5
	X2	606626	Y2	6821179
<b>W-E</b> 3	X1	516303	Y1	6855298
	X2	569183	Y2	6825296
6	X1	525565	Y1	6865509
	X2	588181	Y2	6828700

Illustration 46 : Table des coordonnées du début et fin des profils

### 6.9.2. Description synthétique du modèle géologique obtenu

Les coupes ainsi que les cartes d'altitude et d'épaisseur des formations sont extraites du modèle géologique 3D. Les géométries des structures constituant le bassin et des formations Base (BASE), Gault (GAUL), Cénomaniens basal (CENB), Cénomaniens inférieurs (CENI), Sables du Perche (PERC), Cénomaniens supérieurs (CENS), Sénoniens (SENO), Argiles à silex (ARGS) et Alluvions (ALLU) sont représentées.

La description des documents graphiques extraits du modèle permet d'identifier deux ensembles distincts qui composent le bassin :

- le premier ensemble, se trouvant au Sud de l'emprise, est bordé par l'axe de Senonches (ou axe de Merlerault) entre les failles de l'Eure et de Senonches. Il s'agit d'un bloc surélevé. Les formations d'âge cénomaniens supérieurs et sénoniens ne sont pas présentes. Les argiles à silex recouvrent en partie les Sables du Perche et ont une épaisseur moyenne de 20 m environ.

La formation des Sables du Perche se trouve soit à l'affleurement, soit sous-jacente aux argiles à silex. L'altitude du toit et l'épaisseur des sables du Perche varie entre les deux failles. L'épaisseur de cette formation est plus importante au centre de l'axe.

En-dessous des sables du Perche, les formations du Cénomaniens inférieurs, Cénomaniens basaux et des argiles du Gault présentent une géométrie monotone. Notons une épaisseur importante du Cénomaniens inférieurs de l'ordre de 100 m. Le décalage du toit du CENI créé par la faille de Senonches serait compris entre 70 et 100 m (Illustration 52 B, C (cf. annexe 4 coupe AVEU, 3, 5).

- Au Nord de l'axe de Senonches, toutes les couches sont présentes hormis les sables du Perche (cf. §6.2, page 54). On retrouve :

- **Les formations superficielles :**

Elles se composent :

- des **alluvions** dont le tracé est contraint par l'emprise de la formation définie au préalable. La base des alluvions est une surface d'érosion. L'épaisseur de la formation est

la plus importante le long de la Vallée de l'Avre, notamment localement, près de Verneuil-sur-Avre, en cohérence avec des données de forages indiquant une épaisseur de 10 à 20 m.

- de la formation des **argiles à silex** qui recouvre en partie l'ensemble des formations sous-jacentes. Les argiles à silex étant érosives, la base de la formation correspond au toit de la formation sous-jacente (toit du SENOnien). Au Nord de la vallée de l'Eure, là où le Sénonien affleure, et le long des vallées de l'Avre et de l'Eure, les argiles à silex sont absentes. Seuls les alluvions sont présents, déposés sur la craie.

L'épaisseur est, dans l'ensemble, isopaque de l'ordre de 10 à 30 m avec localement des surépaisseurs de la formation créées par du remplissage karstique (cf. § 75, page 78).

Une épaisseur plus importante est notée selon une direction NNW-SSE, le long de la vallée de l'Avre entre Nonancourt et au nord de Brezolles, puis le long de la vallée de Iton (cf. § 6.10.3, page 95). Au Sud de Conches, les argiles à silex sont épaisses de 60 m, ce qui est vérifié par la présence de forages et connus dans la littérature [12] (cf. Illustration 51, page 96).

#### • **La formation crayeuse du Sénonien :**

La formation sénonienne est érodée par les argiles à silex. On observe au centre Ouest de la zone d'étude une épaisseur variant entre 10 et 50 m. Elle connaît une épaisseur importante de l'ordre de 100 m le long de la vallée de l'Eure, notamment au nord de la zone d'étude. De chaque côté de la vallée de l'Avre, une épaisseur de 80 m environ est notée dans un prolongement de direction N30, alors que le long de la vallée l'épaisseur est moindre. D'après les coupes, cela s'explique soit par la topographie soit par la présence d'argiles à silex. Cette formation se biseaute et disparaît en amont du bassin.

#### • **Les formations crayeuses du Cénomaniens et la formation des argiles du Gault**

Les couches se superposent chronologiquement et présentent une structure monoclinale à ondulée. Il est noté un approfondissement des couches vers le Nord et l'Est du bassin (cf. Annexe 2, 2, 3) ; elles présentent un pendage de 10 à 30° vers le Nord-Est. Elles sont dans l'ensemble isopagues avec localement des variations d'épaisseur pour les couches du CENS et CENI, notamment le long des accidents structuraux (failles (Illustration 52 E (cf. annexe 4 coupe AVEU, 3, 5, 1)) et du demi-dôme de Thymerais (Illustration 52 F (cf. annexe 4 coupe 6, 15))).

#### - Cénomaniens supérieur

Les cartes (annexes 2 et 3 et Illustration 44) indiquent une différence d'altitude du toit de la formation CENS du Sud vers le Nord Est de 200 m environ, évoquant un approfondissement des couches qui est confirmé sur les coupes géologiques (cf. Annexe 4 coupe 5, 11, 15 et Illustration 52 B, D, E). En effet, la couche présente un pendage de 20 à 30° vers le NE. Cette géométrie peut expliquer aussi l'épaisseur importante du Sénonien au Nord du bassin, probablement liée à du comblement dans le bassin par accommodation.

Il est remarqué une épaisseur importante le long des failles : (1) à l'Ouest de la faille de Courtomer ; (2) au Nord de la faille de Senonches ; et (3) à l'Est de la faille du demi dôme de Thymerais. Un axe de direction SW-NE avec une épaisseur importante et une épaisseur moindre de chaque côté de cet axe est observé.

D'après les coupes, la couche présente une ondulation avec une épaisseur quasi isopaque selon la direction SW-NE.

Au Sud du bassin, trois points d'épaisseur importante de l'ordre de 150 m existent : à l'ouest de la faille de Courtomer ; au niveau de la Ferté Vidame et à l'Est de la faille du demi dôme de Thymerais. A ces endroits, le Sénonien est soit inexistant soit de très faible épaisseur, mettant alors en contact le Cénomanién supérieur et les argiles à silex (Illustration 52 A, C, E (cf. Annexe 4, coupe Avre, 3, 5, 11)).

#### - Cénomanién inférieur et basal

Comme le Cénomanién supérieur, la couche du cénomanién inférieur connaît un épaissement au niveau de la faille de Senonches et un approfondissement vers le Nord et Est du bassin d'environ 100 m d'altitude. La formation du cénomanién inférieur est, dans l'ensemble, isopaque avec (i) soit des épaisseurs moindres localement dans la direction NW SE, (ii) soit avec une augmentation de son épaisseur le long de la faille de Senonches vers le Sud.

Une corrélation entre l'approfondissement de la couche CENI et une épaisseur plus importante de CENS, principalement d'Ouest en Est peut être observée (Illustration 52, (cf. Annexe 4)).

Le cénomanién basal est isopaque d'épaisseur d'environ 15 m.

#### - formation « GAUL » (argiles du Gault et sable de l'albien)

La formation « **Gaul** » du modèle géologique (comprenant les argiles de gault et les sables de l'albien) s'approfondi vers le Nord Est de 60m environ. Son épaisseur est relativement isopaque de l'ordre de 20 à 30 m. Localement, le long de Verneuil-sur-Avre, une épaisseur quasi nulle est enregistrée alors que le long de Brézolles l'épaisseur est maximale, atteignant 40 m. Sur la carte des épaisseurs (cf. Annexe 3), cette observation est visible par la présence de deux cellules d'épaisseur différente, créées par des données différentes de forages proches. La faible densité de données explique aussi les artéfacts existants, notamment visibles sur la carte de l'épaisseur. En effet les failles créent une interpolation discontinue en raison de faibles contraintes de chaque côté des failles.

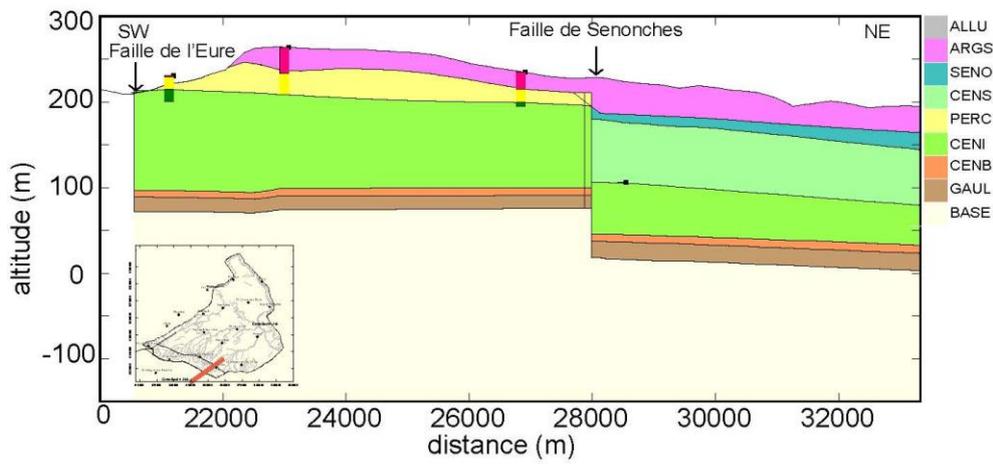
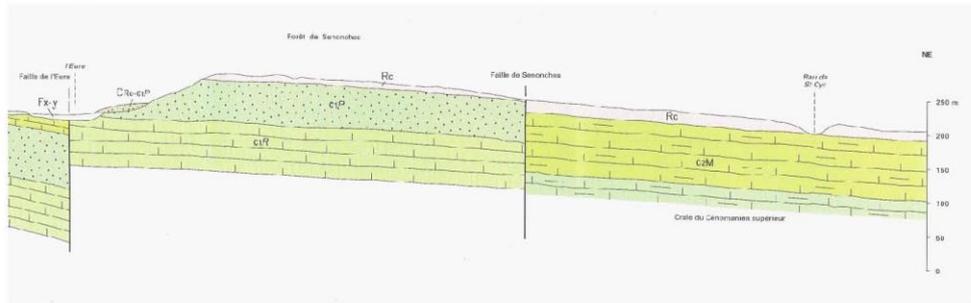
## **6.10. VALIDATION DU MODELE**

Une comparaison des résultats du modèle avec des données géologiques et géophysiques, non utilisées pour la construction du modèle, ainsi que des références bibliographiques est effectuée pour permettre la validation du modèle.

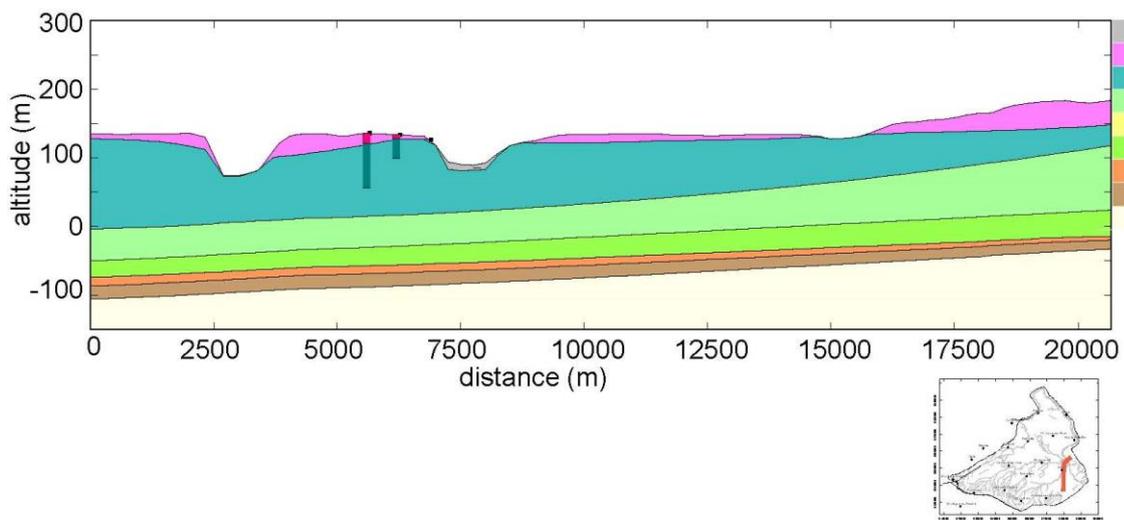
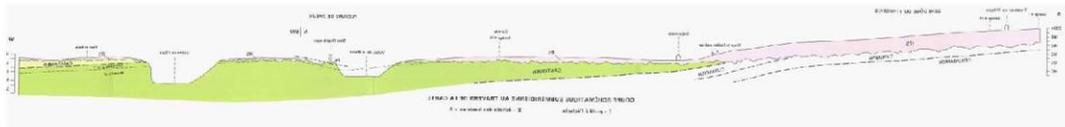
### **6.10.1. Comparaison des coupes 2D issues du modèle avec les coupes géologiques**

Les coupes issues du modèle se corrélient correctement avec les coupes des cartes géologiques (Illustration 47). Les comparaisons montrées ici, valident donc le modèle. Le modèle apporte une information supplémentaire sur la géométrie des surfaces en profondeur et supposée (Illustration 47, coupe B).

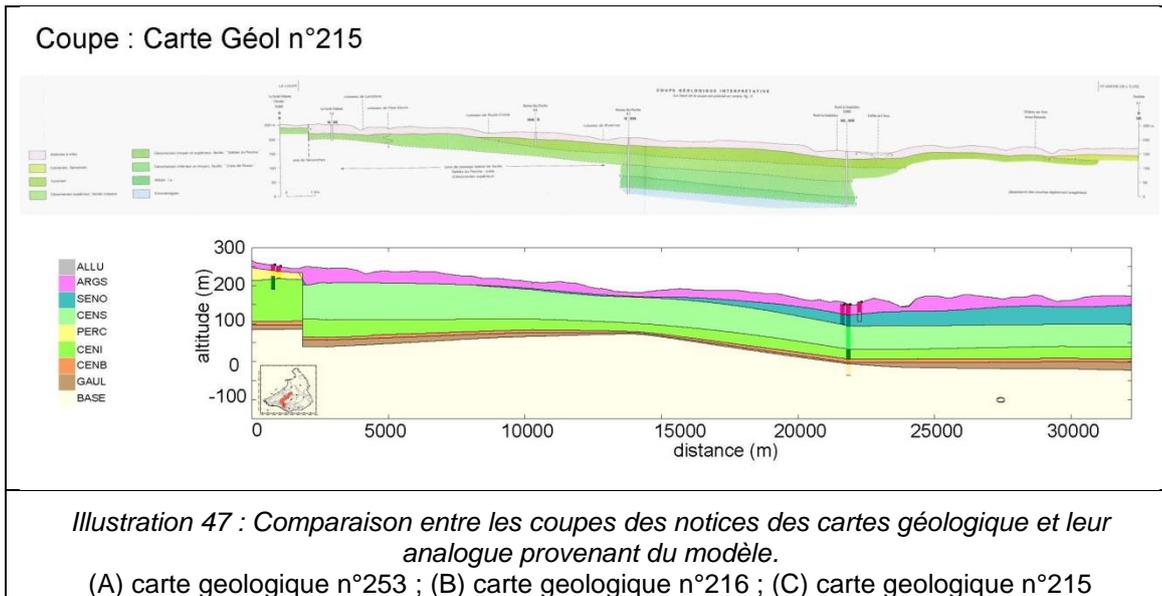
A Coupe : Carte Géol n°253



B Coupe : Carte Géol n°216



C



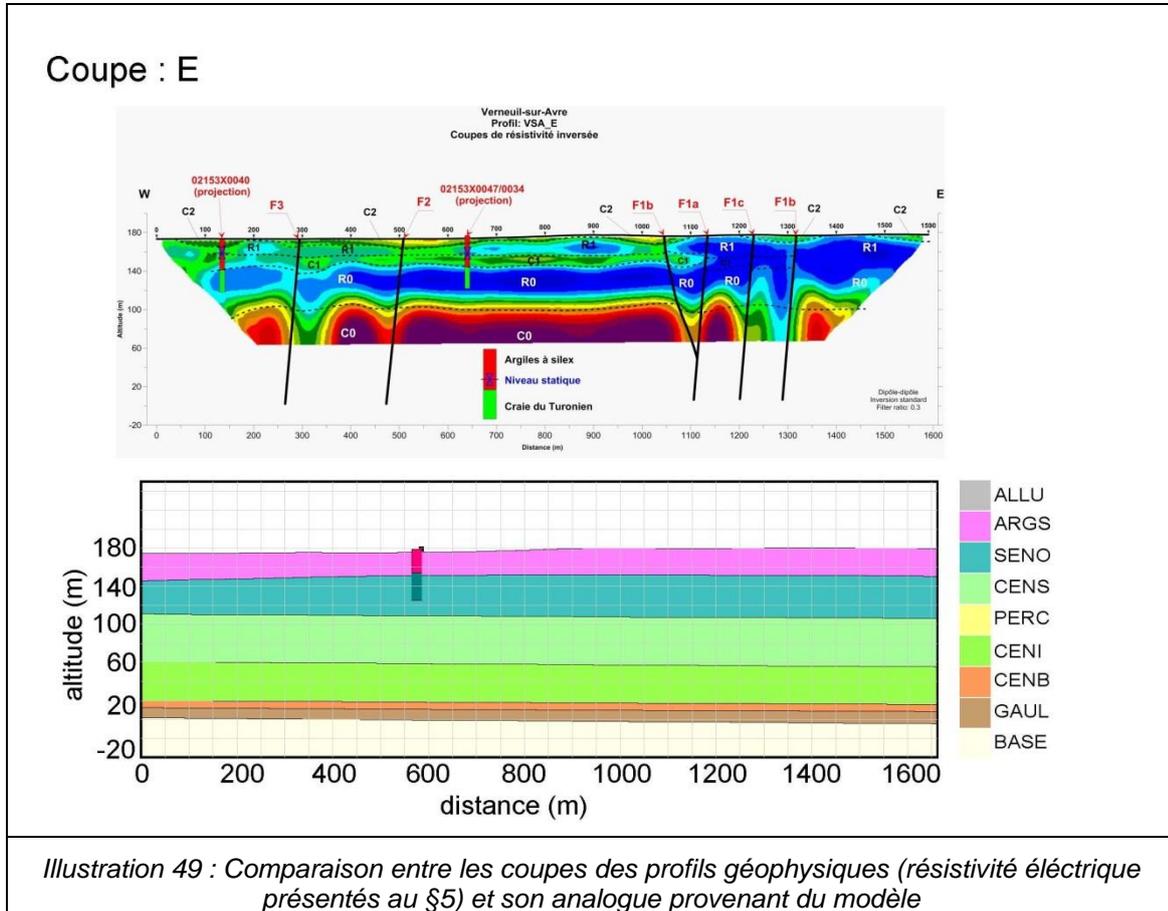
Coupe	Coord X (m) (L93)	Coord Y (m) (L93)	Distance (m)	
<b>Carte Géol n°215</b>	X1	546349.56	Y1 6833980.50	0.00
	X2	547134.00	Y2 6836614.50	2748.30
	X3	541852.06	Y3 6841962.50	10264.71
	X4	543030.88	Y4 6844115.00	12719.15
	X5	552656.88	Y5 6849293.50	23649.57
	X6	555659.44	Y6 6854527.00	29683.17
	X7	557978.38	Y7 6855543.50	32215.07
<b>Carte Géol n°216</b>	X1	583143.69	Y1 6855668.00	
	X2	583143.69	Y2 6855668.00	0.00
	X3	579899.63	Y3 6852778.50	4344.22
	X4	579601.69	Y4 6836478.00	20647.67
	X5	579581.56	Y5 6836498.50	20676.33
<b>Carte Géol. n°253</b>	X1	558315.38	Y1 6835148.00	0.00
	X2	531170.25	Y2 6815814.50	33326.30

Illustration 48 : Table des coordonnées du début et fin des profils

### 6.10.2. Comparaison des coupes 2D issues du modèle avec les profils de résistivité électrique (cf. § 5)

Des coupes géologiques, dont le tracé correspond à celui des profils de résistivité électrique présentés au §5, sont extraites du modèle géologique. L'illustration 49 montre par exemple une coupe le long du tracé du profil VSA\_E. L'épaisseur et la géométrie des couches les plus superficielles se corrént à l'interprétation du profil de résistivité électrique. De plus, le modèle donne une estimation de la profondeur, de l'épaisseur et de la géométrie des couches

profondes au contraire des profils de résistivité électrique limités par la profondeur d'investigation.



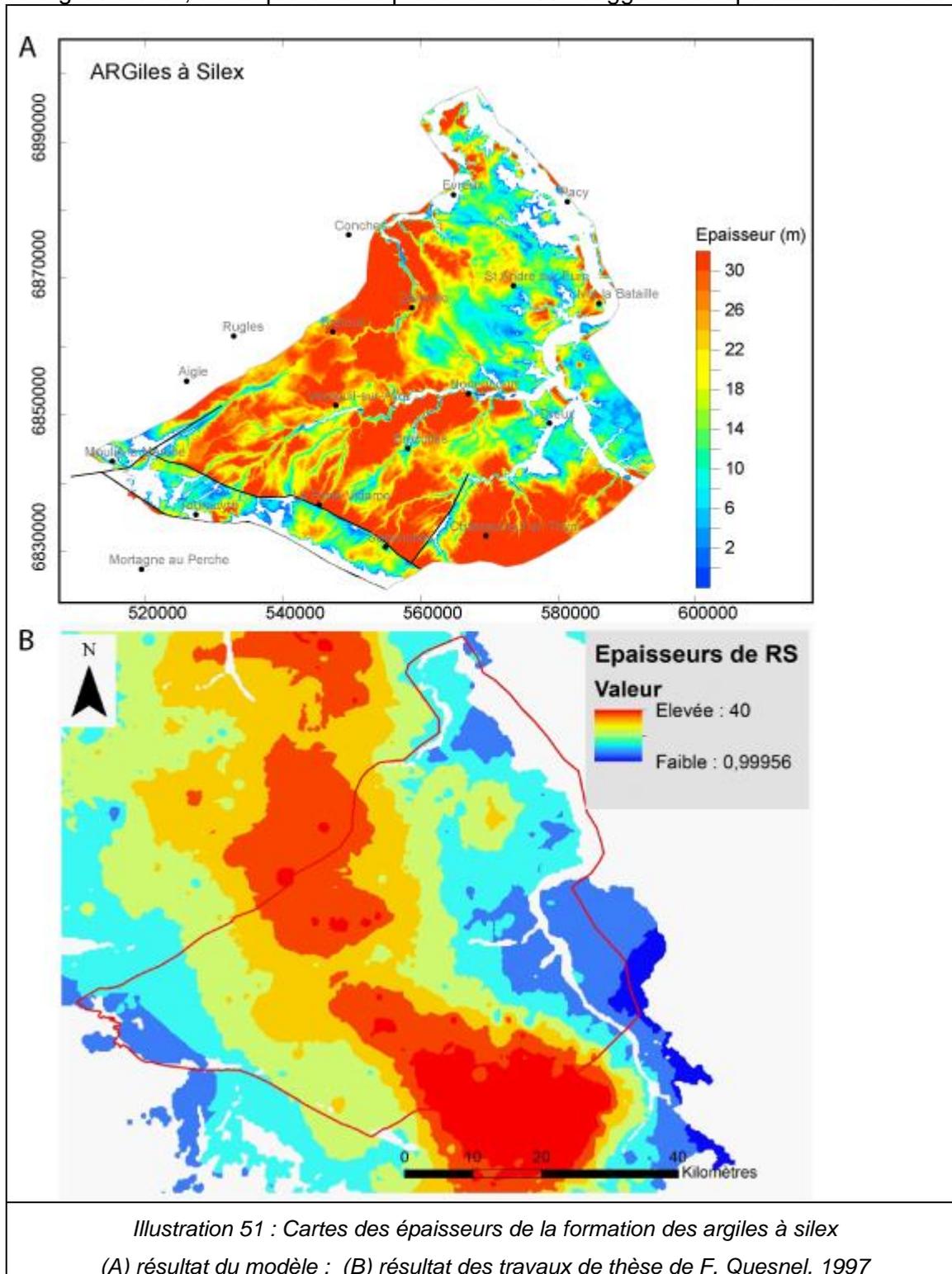
Coupe	Coord X (m) (L93)		Coord Y (m) (L93)	
E	X1	549012.94	Y1	6854609.00
	X2	550575.69	Y2	6855176.50

Illustration 50 : Table des coordonnées du début et fin des profils

**6.10.3. Comparaison entre les cartes d'épaisseur (1) de la formation argiles à silex, issue du modèle et (2) des formations résiduelles (argiles à silex), extraite de la thèse de F. Quesnel (1997)**

Les cartes des épaisseurs des argiles à silex (Illustration 51), l'une calculée à partir du modèle et l'autre produite dans le cadre des travaux de thèse de F. Quesnel (1997), indiquent en général une estimation comparable des épaisseurs dans l'emprise de la zone d'étude. L'estimation de l'épaisseur au centre du secteur d'intérêt (zone d'étude) dans la direction NW-SE et le long de la vallée de l'Eure est semblable dans les deux cartes. Notons que la carte issue du modèle montre localement la présence d'argile à silex le long de la vallée de l'Eure. A ces endroits, la présence de la formation est observée dans les forages et s'explique par l'existence de poches d'argiles participant au remplissage des cavités karstiques (cf. page 78).

Des différences apparaissent toutefois au sud de la zone d'étude, le long de la faille de Senonches et en amont de la vallée de l'Avre : le modèle prédit une épaisseur d'au moins 30 m d'argiles à silex, alors que la carte produite en 1997 suggère des épaisseurs moindres.

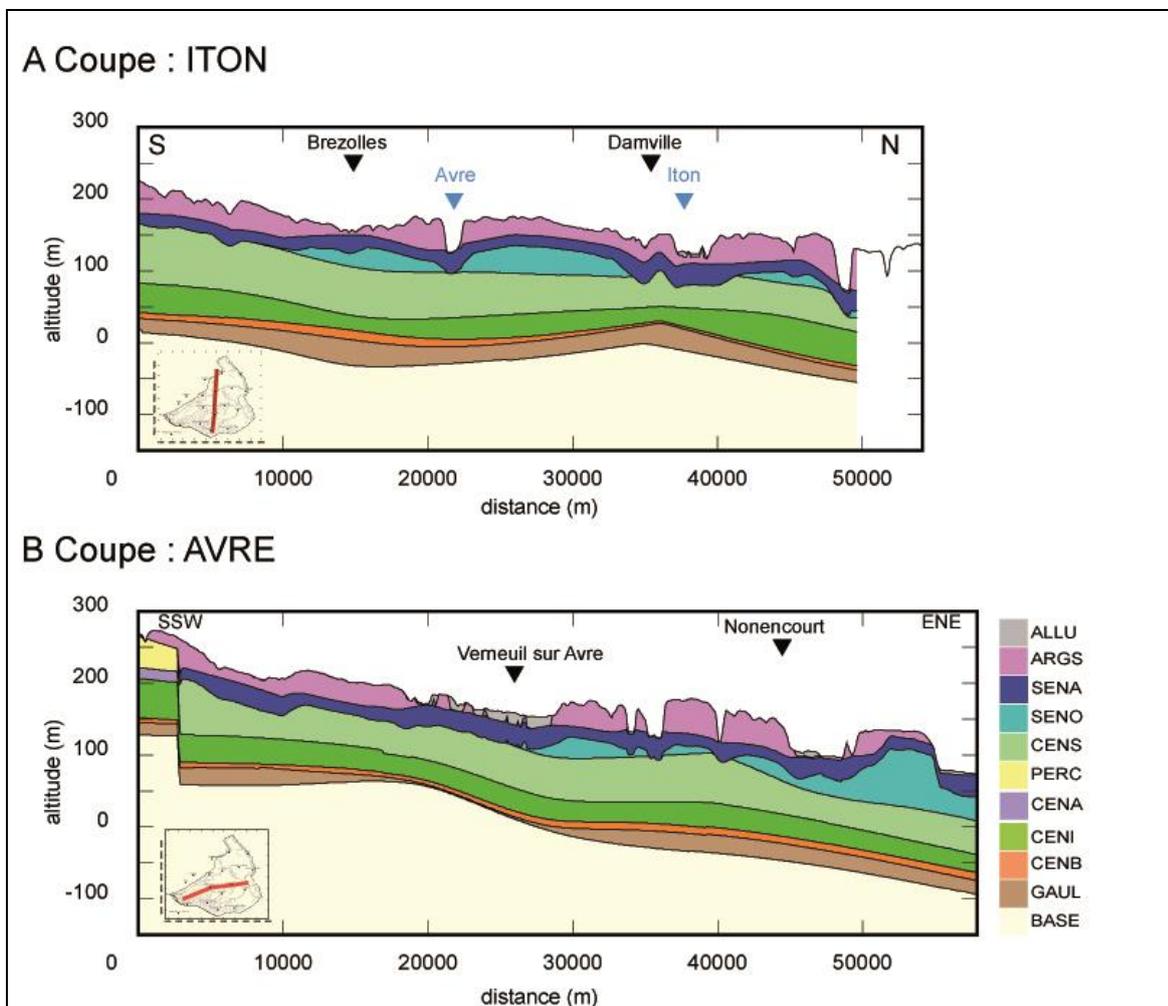


### 6.11. MODELE GEOLOGIQUE AVEC LES FORMATIONS DE CRAIES ALTEREES

Pour l'étude hydrodynamique du bassin de l'Avre, des couches de la craie altérée sous-jacentes aux argiles à silex et aux sables du Perche, sont modélisées (cf. § 6.8.7, page 79).

Les coupes (Illustration 52) montrent les géométries et les évolutions des différentes formations composant la zone modélisée. Les formations susceptibles d'être les plus aquifères sont les craies altérées (SENA et CENA) ainsi que les craies du Turonien supérieur et Sénonien (SENO).

Les différentes coupes ci-dessous, montrent que le SENO est présent avec des épaisseurs importantes essentiellement à l'aval du bassin de l'Avre. Les plus fortes épaisseurs sont rencontrées au droit de Dreux et à l'aval. En remontant vers l'amont, la formation SENO se biseaute et disparaît (cf. coupe A, B, D, E, F).



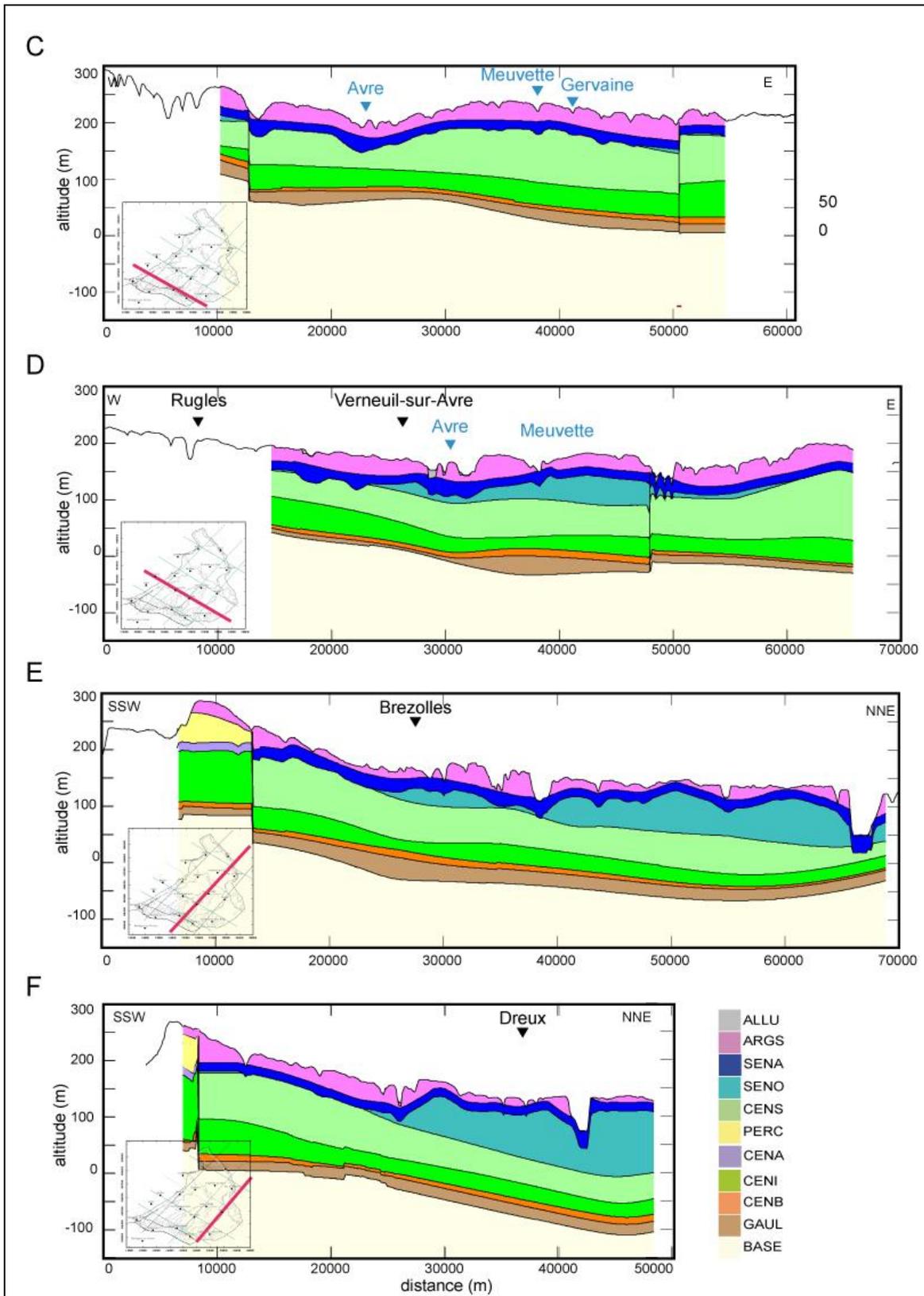
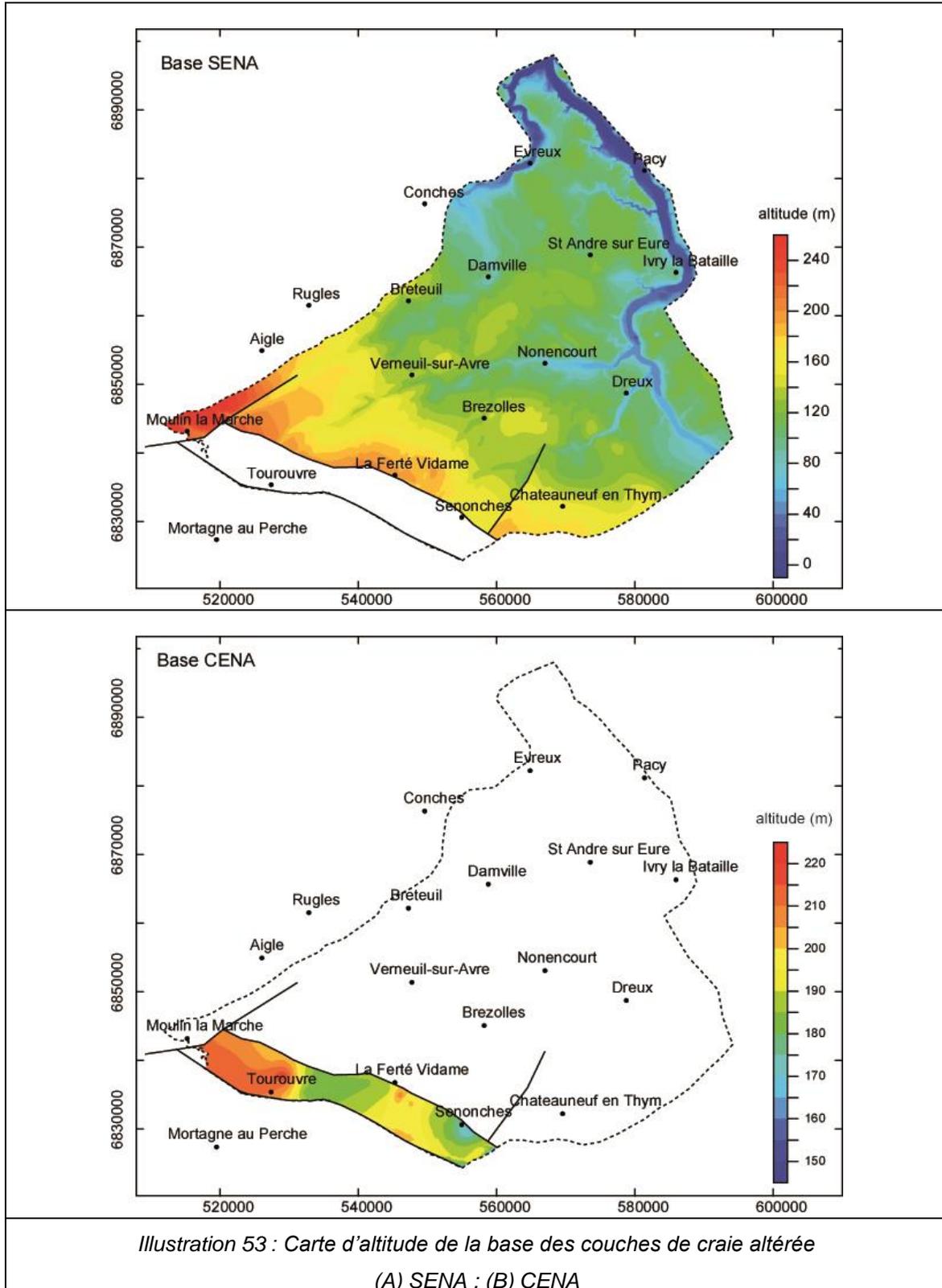


Illustration 52 : Coupes géologiques (lignes brisées)

(cf. Illustration 45) issue du modèle géologique contenant les couches d'altération de la craie (SENA (en bleu) et CENA (en violet)).



## **6.12. RESTITUTION/EXPORT DU MODELE GEOLOGIQUE**

Le modèle géologique du bassin de l'Avre a été créé pour fournir au modèle hydrodynamique, la géométrie des formations géologiques constituant le réservoir hydrogéologique et auxquelles des propriétés pétro-physiques sont définies.

Le modèle est exporté sous forme de grilles toit/mur/épaisseur de chaque formation et sera exploité dans le logiciel de simulation hydrodynamique Marthe.

Dans les annexes 2 à 4 se trouvent les cartes d'altitude des murs ou toits des formations, celles des épaisseurs des couches et des coupes géologiques sélectionnées.

## 7. Conclusion

L'étude préalable (rapport BRGM/RP-60458-FR de février 2012 de phases 1 et 2) avait mis en évidence des lacunes de connaissances nécessitant d'acquérir des données complémentaires de terrain.

Au cours de la phase 3 de l'étude, des investigations complémentaires ont été réalisées à savoir :

1. Un multitraçage dont l'objectif était de connaître les exutoires du système karstique de la Meuvette et de la Gervaine (exutoire vers le système karstique des sources de la Vigne ou vers le karst de la Blaise ?) ;
2. L'équipement de 2 lignes de piézomètres en continu entre l'Iton et l'Avre afin de vérifier si la crête piézométrique séparant ces 2 cours d'eau s'efface en période de basses eaux (hypothèse mise en évidence ou supposée à la fois par les cartes piézométriques régionales de basses eaux, par les cartes piézométriques de 1990/1991 réalisées par Burgeap [3] et par G. Souchet de Eau de Paris en 1994 [23]) ;
3. La réalisation d'une campagne géophysique dont l'objectif était de mieux comprendre le schéma structural de la partie médiane du bassin de l'Avre et, notamment, de valider ou non l'hypothèse émise par BURGEAP en 1991 [3], qui supposait la présence d'un faisceau de failles dans ce secteur avec un amas d'argile faisant barrage à l'écoulement du karst du bloc Ouest, provoquant la résurgence de l'aquifère amont. Seize panneaux électriques répartis sur 6 profils d'une longueur variant entre 870 et 1 590 m ont été réalisés en configuration dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger. Le linéaire total est de 8 490 m.

Ces investigations ont montré les résultats suivants :

1. Dans les conditions hydrogéologiques de l'été 2013, les résultats du traçage n'ont pas montré de connexion karstique entre les BV de l'Avre et de la Blaise. Le système karstique de la Gervaine et de la Meuvette ne semble pas non plus connecté au système karstique des sources de la Vigne. Seule une restitution a été constatée sur des sources situées dans la vallée de la Meuvette (résurgences n°02158X0050/HY à 02158X0053/HY). Les vitesses maximales de transit, entre les points d'injection et ces sources, sont comprises entre 118 et 139 m/h. Il convient de souligner qu'une incertitude existe au niveau des résultats (qui montrent l'absence de restitution du traceur), liée à la nature non optimum du traceur dans le cas de longues distances séparant le point d'injection des points de surveillance ;
2. Concernant le suivi en continu des niveaux sur les deux lignes de piézomètres, sur la période allant de mars 2013 à avril 2014, la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans le secteur des Barils semble bien marquée. En revanche, dans le secteur de Verneuil-sur-Avre, la crête piézométrique est présente au niveau de Piseux mais semble peu marquée (2,14 m au-dessus de l'Iton le 11-12-2013 et 0,88 m au-dessus de l'Iton le 06/05/2014). Or le cycle hydrologique qui a fait l'objet de ce suivi se situait dans un niveau de moyennes eaux pluriannuelles. Il n'est donc ainsi pas à exclure que la crête piézométrique séparant l'Avre de l'Iton dans ce dernier secteur disparaisse lors des périodes de basses eaux pluriannuelles. Il serait nécessaire de poursuivre à plus long terme le suivi des niveaux de nappes sur les piézomètres de Piseux ;
3. Enfin, dans le cadre de la campagne géophysique, 6 coupes géo-électriques ont été établies et ont mis en évidence des discontinuités verticales qui ont été assimilées à des failles. Le faisceau de faille F1 et, plus particulièrement F1a, est probablement associé à une zone de fracturation et d'argilisation marquée par la présence d'une anomalie

conductrice sub-verticale approximativement centrée sur cette faille F1a. Cette zone d'argilisation conductrice constituerait un barrage à l'écoulement des eaux de l'aquifère du Turonien et expliquerait la présence des sources en amont de cette barrière étanche. Plus au Nord, en direction de Breteuil, le fonctionnement du faisceau F1 serait différent : aucune des failles constituant ce faisceau n'est associée à une anomalie conductrice marquant la présence d'une zone d'argilisation. On peut donc supposer que cette structure aurait, plus au Nord, un caractère plutôt drainant.

A l'issue de ce travail d'acquisition de données, une modélisation géologique du bassin de l'Avre en 3D a été réalisée (phase 4a). L'objectif du travail a été de construire un modèle géologique numérique en 3D en vue de fournir la géométrie des réservoirs au modèle hydrogéologique.

Le logiciel GDM-Multilayer 2014 (BRGM) a été utilisé pour la construction du modèle géologique en trois dimensions. Onze formations géologiques ont été modélisées :

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
ALLU		ALLuvions		F11
ARGS	EROD	ARGiles à Silex	B11	F10
SENA	EROD	SENonien Altéré	B10	F09
SENO	EROD	SENonien	B09	F08
CENS		CENomanien Supérieur	T07	F07
PERC		Sable de PERChe	T08	F06
CENA		CENomanien inférieur Altéré	T05	F05
CENI	EROD	CENomanien Inférieur	B05	F04
CENB		CENomanien Basal	T03	F03
GAUL		GAULt	T02	F02
BASE	EROD	BASE	B02	F01

Le travail de modélisation a consisté (i) à compiler, préparer, et mettre en cohérence les données nécessaires à la construction du modèle ; (ii) à interpoler ces données ; (iii) à combiner les surfaces modélisées.

Le modèle géologique reproduit la géométrie des structures du bassin de l'Avre en trois dimensions, de laquelle sont également extraites des coupes géologiques en 2 dimensions.

Les résultats de la modélisation sont fournis sous forme de cartes montrant l'altitude du toit ou mur des différents horizons géologiques, leurs épaisseurs, ainsi que de coupes géologiques sélectionnées.

Des fichiers d'exports du modèle ont été réalisés sous forme de grilles de l'altitude des toits et murs des horizons modélisés, et qui seront ensuite importés dans le modèle hydrodynamique *Marthe* pour la simulation des écoulements.

## 8. Bibliographie

- 1 **Wazi N. (1988)** Le Crétacé du Roumois (Vallée de l'Oison) et le Tertiaire-Quaternaire des régions voisines de la basse vallée de la Seine (Haute Normandie). Stratigraphie et tectonique.
- 2 **Valdès D. (2005)** Variabilité spatiale du fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique de la craie (département de l'Eure, France)
- 3 **BURGEAP (1991)** Etude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Vigne et du Breuil
- 4 **P. Lebret, F. Ménillet, P. Béguin (1996)** Carte géologique de la France à 1/50000, Verneuil (215)
- 5 **aH2D (2008)** Sources de la Vigne, Etude préalable à la DUP des périmètres de protection des sources de la Vigne (28) - Etude d'environnement et de vulnérabilité du bassin d'alimentation des captages.
- 6 **Juinet P. (1974).** La transgression crétacée sur la bordure orientale du Massif Armoricaire Aptien, Albien, Cénomaniens de Normandie et du Maine. Le stratotype du Cénomaniens. Thèse. 2 vol, 806 p.
- 7 **F. Ménillet, P. Lebret, P. Béguin (1998)** Carte géologique de la France à 1/50000, L'Aigle (214)
- 8 **F. Ménillet (1994)** Carte géologique de la France à 1/50000, Dreux (216)
- 10 **E. Lasseur (2007)** La craie du bassin de Paris (Cénomaniens-Campaniens, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D),
- 11 **Laignel B. (1997)** Les altérites à silex de l'Ouest du bassin de Paris - Caractérisation lithologique, génèse et utilisation potentielle comme granulats
- 12 **Quesnel F. (1997).** Cartographie numérique en géologie de surface Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Thèse. 430 p
- 13 **SAFEGE (avr-92)** Etude hydrogéologique de la région du Perche Nord (1ère phase)
- 14 **SAFEGE (juin-93)** reconnaissance géophysique des Sables du Perche dans la Région de Senonches, rapport d'études
- 15 **SAFEGE (mai-94)** Aquifère des sables du Perche, Forages d'essai, rapport final
- 16 **OYO RGS (déc-08)** Recherche en eau en vallées de l'Avre et de l'Eure. Syndicat d'étude de Nonancourt. 1ère phase : synthèse bibliographique. Etude hydrogéologique et environnementales préalables. Proposition de sites favorables à la recherche en eau.

- 17 **HYDROEXPERT (oct-96)** Expériences de multitraçages sur le plateau de saint andré de l'Eure. Protection de la ressource en eau.
- 18 **O. Griere (juil-09)** Détermination des périmètres de protection de la source du Breuil à Verneuil sur Avre (27)
- 19 **GAUDRIOT (oct-00)** Etude hydrogéologique de la région de Brezolles
- 20 **G. Moguedet (2000)** Carte géologique de la France à 1/50000, La loupe (253)
- 21 **G. Moguedet (1998)** Carte géologique de la France à 1/50000, Mortagne-au-Perche
- 22 **CE3E (2009)** Etude PPRE de l'Iton - Pase 2 - Synoptique de répartition des débits en situation d'étiage
- 23 **G. Souchet (1994)** Recherche de l'origine de l'eau de la source du Breuil
- 24 **J-C. Martin, E. Rouxel-David, D. Batowski (2004)** Elaboration d'une règle de gestion volumique de la ressource en eau du bassin de la Barbuise, rapport final
- 25 **J-C. Martin (2008)** Elaboration d'une règle de gestion volumique en eau de la nappe de Bièvre-Valloire, phase 1 - Acquisition, mise en forme et analyse des données disponibles
- 26 **J-C. Martin (2008)** Elaboration d'une règle de gestion volumique en eau de la nappe de Bièvre-Valloire, phase 2-modélisation globale des écoulements souterrains, phase 3 - élaboration de règles de gestion volumique
- 27 **Syndicat Intercommunal de la Vallée d'Avre (2006)** Etat des lieux
- 28 **Companie générale de géophysique (2001)** Etude hydrogéologique de l'aquifère de la craie
- 29 **A. Noulin, A. Rimbaud, A. Rodde (2011)** Gestion de l'étiage sur le bassin de l'Avre : bilan besoins-ressources et retour d'expérience
- 30 **Desprez N. et Martins Cl. (1972)** Protection des captages de la ville de Paris dans la région de la Ferté Vidame (Eure-et-loir). Rap. BRGM/72SGN323BDP
- 31 **Sykioti O., Deffontaines B., Chrowicz J., Obert D., De Marsily G., Lauerjat J. et Carvalho J., (1996)** Imagerie numérique multisource de la surface topographique. Application à la géométrie d'un milieu karstique : Verneuil-sur-Avre. Bulletin de la Société géologique de France 1996 ; t167, n°2, pp. 269-284
- 32 **JF. Vernoux, E. Buscarlet, L. Gourcy, A. Wuilleumier (2010)** - Champs captant de Montreuil-sur-Eure et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables, rapport final – rapport BRGM/RP-58587-FR, 139 pages, 81 figures, 10 tableaux, 2 annexes
- 33 **Bourgine B. (2006).** Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer - Version 3 - BRGM/RP-53111-FR. Rapport technique, BRGM
- 34 **Bourgine et al. (2008).** Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment. The Paris case., Proceeding of the Eighth international Geostatistics

Congress, J.M. Ortiz and X. Emery Editors, Vol 2, pp. 951-960, <http://www.geostats2008.com/2008/cierre2008/?pag=download2&leng=in&IDSESSION=155>

**35 FILY G. & RIOULT M. (1980).** - Normandie et Maine. In : THIERRY J. (Coord.), Chapitre Jurassique moyen, Synthèse géologique du Bassin de Paris. - Mém. Bur. Rech. Géol. Min., 101, pp. 145-150.

**36 RIOULT M. (1980).** - Maine, Perche, Normandie. In : DEBRAND-PASSARD S., ENAY R. & RIOULT M. (Coord.) Chapitre Jurassique supérieur, Synthèse géologique du Bassin de Paris. - Mém. B.R.G.M, 101, pp. 214-216.

**37 RIOULT M. (1980).** - Jurassique moyen-supérieur. In : MEGNIEN Ed. Synthèse géologique du Bassin de Paris, vol. III, Lexique de noms de formations. - Mém. B.R.G.M., 103, pp. 106-108, 118-119, 124, 126, 129, 130-131, 132-133, 146-147, 151, 155-156, 157, 160-161, 171, 173-175, 176, 178-179, 184-185, 186-187, 189-190, 194-195, 200-201, 204-205, 206, 209-210, 213, 214, 227-228, 230-231, 233, 239-241, 243-246,

**38 MUSSET R. (1920).** – Le relief du Perche. Ann. Géographie, 29, p.99-126.

**39 GAUDRIOT S.A. (2001)** – Campagne d'analyse nitrates sur 3 forages agricoles sur le plateau d'Evreux - Saint-André-de-l'Eure. Rapport EN-40402.

**40 Notices des cartes géologiques à 1/50 000ème suivantes :**

- **FILY G., COUTARD J-P., RIOULT M., AUFFRET J-P., LARSONNEUR C, LA QUÉRIÈRE de P. (1989)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille GRANDCAMP-MAISY (95) - Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 55 p. Carte géologique par FILY G., COUTARD J-P., PAREYN C, RIOULT M., AUFFRET J-P., LARSONNEUR C. (1987).
- **VERNHET Y., BAIZE S., COUTARD J-P., LANGEVIN C. (1999)** – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Balleroy (118). Orléans : BRGM, 129 p. Carte géologique par Vernhet Y. et al. (1999).
- **VERNHET Y, LEROUGE G., HERVY V, BESOMBES J-C, LANGEVIN C. (2000)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Torigni-sur-Vire (144). Orléans : BRGM, 126 p. Carte géologique par Y. Vernhet et al. (2000).
- **MAURIZOT P., AUFFRET J-P, BAIZE S., DEROIN J-P, DUGUÉ O., FILY G., LE GALL J., LELIEPAULT F., MAZENC B., PELLERIN J. (2000)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Bayeux - Courseulles-sur-Mer (119). Orléans : BRGM, 151 p. Carte géologique par MAURIZOT P. et al (2000).
- **VERNHET Y., MAURIZOT P., LE GALL J., GIGOT P., DUPRET L., LEROUGE G., BESOMBES J-C., BARBIER G., PAY T., avec la collaboration de PELLERIN J., DUGUÉ O., FILY G. (2002)** – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Villers-Bocage (145). Orléans : BRGM, 229 p. Carte géologique par Y. VERNHET et al. (2002).
- **DORÉ F., DUPRET L., avec la collaboration de PELLERIN J., RIOULT M., LECOINTE A., VERRON G. (1993)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Condé-sur-Noireau (175). Orléans: BRGM, 74 p. Carte géologique par F. Doré, L. Dupret, F. Dumesnil, J. Pellerin et coll. (1993).
- **RIOULT M., COUTARD J-P., LA QUÉRIÈRE de P., HELLUIN M., LARSONNEUR C., PELLERIN J., PROVOST M. (1989)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille CAEN (120) - Orléans: Bureau de recherches géologiques et minières, 104 p. Carte géologique par RIOULT M., COUTARD J.P., HELLUIN M., PELLERIN J., QUINEJURE-HELLUIN E., LARSONNEUR C., ALAIN Y. (1986).

- **DEROIN J.P., LEROUGE G., BARBIER G., VERNHET Y., COUTARD J-P., OZOUF J-C., LANGEVIN C. (1999)** – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Mézidon (146). Orléans : BRGM, 150 p. Carte géologique par J.P. Deroin et al. (1999).
- **GIGOT P., DUPRET L., LE GALL J. avec la collaboration de COUTARD J-P., OZOUF J-C., PAY T., LECOINTE A., DESLOGES J., DEROIN J-P. (1999)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Falaise (176). Orléans : BRGM, 154 p. Carte géologique par P. Gigot, L. Dupret, J. Le Gall (1999).
- **KUNTZ G., MÉNILLET F., LE GALL J., RIOULT M., CALLIER L., PELLERIN J., LA QUÉRIÈRE de P., VAUTRELLE C., VERRON G. (1989)** - Notice explicative, Carte géol. France 1/50000, feuille ARGENTAN (212) - Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 99 p. Carte géologique par MÉNILLET F., GÉRARD J., LE GALL J., DORÉ F., CALLIER L., KUNTZ G., RIOULT M., PELLERIN J., VERRON G. (1987).
- **GUYADER J., PAREYN C. et VIALLEFOND L., avec le concours de P. JUIGNET (1970)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille LE HAVRE, - Orléans: Bureau de recherches géologiques et minières, 18 p
- **PAREYN C., (1970)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille LISIEUX (121) - Orléans: Bureau de recherches géologiques et minières, 15 p.
- **MÉNILLET F., avec la collaboration de BOURDILLON C., FAUCONNIER D., HOUARI A., LANGEVIN C., HÉRARD B., BÉGUIN P. (1999)** – Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Livarot (147). Orléans : BRGM, 98 p. Carte géologique par Ménillet F. et al. (1999).
- **MÉNILLET F., RIOULT M., avec la collaboration de HAVLICEK P., LECOINTE A., MONCIARDINI C., PASCAUD P, (1994)** - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Vimoutiers (177). Orléans BRGM, 91 p. Carte géologique par F. Ménillet et al. (1994).
- **MÉNILLET F., GÉRARD J., avec la collaboration de HÉRARD B., LANGEVIN C., LEMOINE B., LETURCQ T., PELLERIN J., QUESNEL F. (1997)** – Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Sées (213). Orléans; BRGM, 103 p. Carte géologique par F. Ménillet, J. Gérard, G. Kuntz, T. Leturcq, J. Pellerin, F. Quesnel (1997).

## **Annexe 1**

-

**Campagne de traçage de 2013 : rapport IDDEA n°IC130157  
version C de janvier 2014 présentant les résultats**





IDDEA



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

---

## Vallée de l'Avre - Multitraçages campagne 2013

### Rapport Final

---



<b>Réf. Devis</b> ID130088	<b>Réf. Du rapport</b> IC130157
<b>Réf. Du client : HADATNN01300214</b>	
Indice : A	Date : 15/11/2013
Indice : B	Date : 19/12/2013
Indice : C	Date : 13/01/2014
Rédacteur : N. BRETOT	
Vérificateur : N. BRETOT	



## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LES POINTS D'INJECTION ET LES TRACEURS UTILISES.....</b>	<b>5</b>
2.1. POINTS D'INJECTION .....	5
2.2. TRACEUR UTILISE .....	5
2.3. PRECAUTIONS POUR L'INJECTION ET L'ECHANTILLONNAGE .....	5
2.4. POINTS ET MODE DE SUIVI .....	6
<b>3. PLANNING D'INTERVENTION .....</b>	<b>8</b>
<b>4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....</b>	<b>9</b>
4.1. RESULTATS DES JAUGEAGES.....	9
4.2. RESULTATS DES SUIVIS DES HAUTEURS ET DES VITESSES .....	11
4.3. RESULTATS DES SUIVIS AU FLUORIMETRE DE TERRAIN .....	13
4.3.1. <i>Suivi au Forage de Dampierre sur Avre - AEP 216-1-001 .....</i>	<i>14</i>
4.3.2. <i>Suivi au Forage de « Chennevières » - AEP 216-5-020.....</i>	<i>15</i>
4.3.3. <i>Suivi au captage de Launay .....</i>	<i>17</i>
4.4. RESULTATS DES SUIVIS AVEC ECHANTILLONNEUR AUTOMATIQUE .....	18
4.4.1. <i>Suivi à la source de l'étang de Dampierre sur Blévy .....</i>	<i>18</i>
4.4.2. <i>Suivi sur la Meuvette à Dampierre sur Avre .....</i>	<i>18</i>
4.4.3. <i>Suivi sur la Meuvette au Moulin Neuf et les résurgences amont.....</i>	<i>18</i>
4.5. EXPLOITATION ET PRESENTATION DES RESULTATS.....	20
4.5.1. <i>Méthode d'interprétation quantitative .....</i>	<i>20</i>
4.5.2. <i>Synthèse des résultats positifs .....</i>	<i>25</i>
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>27</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Description de l'expérience .....	7
Figure 2 : Implantation des points de jaugeage .....	10
Figure 3 : suivi des hauteurs à l'aval de l'étang de Dampierre sur Blévy .....	11
Figure 4 : suivi des hauteurs sur la Meuvette à Dampierre sur Avre .....	11
Figure 5 : Suivi des hauteurs et des vitesses sur la Meuvette au Moulin Neuf .....	12
Figure 6 : Fluorescence au Forage de Dampierre sur Avre .....	14
Figure 7 : Fluorescence au Forage de « Chennevières » .....	15
Figure 8 : Rythme de pompage au forage de Chennevières.....	16
Figure 9 : Fluorescence au captage de Launay.....	17
Figure 10 : Concentrations en Naphtionate de Sodium sur la Meuvette au Moulin Neuf.....	18
Figure 11 : Concentrations en Naphtionate de Sodium sur la Meuvette au Moulin Neuf et sur les résurgences en amont.....	19
Figure 12 : Approche systémique des traçages .....	22
Figure 13 : Résultats de l'expérience .....	26

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Planning des échantillonnages.....	8
Tableau 2 : Résultats des jaugeages .....	9
Tableau 3 : Bilan de Restitution du Naphtionate de Sodium.....	25

## Liste des annexes

Annexe 1 : Détail des injections	
Annexe 2 : Jaugeages	
Annexe 3 : ANALYSES CETRAHE	
Annexe 4 : Interpretation restitution sur la MEUVETTE au MOULIN NEUF	

**GLOSSAIRE**

AEP	Alimentation en Eau Potable
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS	Banque de données du Sous-Sol
IGN	Institut National Géographique
NGF	Nivellement Général de France
MES	Matières En Suspension
UV	Ultra-Violet

Mots clefs		Département		Communes
Traçage	Vallée de l'Avre	Eure et Eure et Loir	27 -28	Brézolles

## 1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats de l'expérience de traçage effectuée pour le compte du BRGM en juillet-août 2013.

## 2. Les points d'injection et les traceurs utilisés

### 2.1. Points d'injection

Conformément au cahier des charges, les injections ont été réalisées sur la Meuvette, à l'aval immédiat du ruisseau des souches et sur la Gervaine au lieu-dit « la corbière ».

On se reportera à l'annexe 1 qui présente en détail leur localisation ainsi que la fiche de déclaration des traçages.

Les accès ont été validés sur place avec le maître d'ouvrage. A ce sujet, il nous paraît important de remercier Patrick VALLON du SIVA pour sa connaissance du terrain et son aide précieuse pour l'obtention des différentes autorisations préalables aux injections.

### 2.2. Traceur utilisé

A la demande des collectivités exploitant les différents captages AEP susceptibles d'être atteint par une restitution, il a été décidé de ne pas utiliser de traceur pouvant provoquer une coloration des eaux captées pour l'AEP. Un seul traceur a donc été utilisé pour les 2 traçages : le Naphthionate de Sodium réputé " incolore ». Il est en réalité visible uniquement dans l'Ultra-Violet.

Au regard de la distance entre les points d'injection et les points de suivi les plus éloignés, la quantité de traceur injecté s'élève à 60 kg par point d'injection, soit 120 kg au total.

L'utilisation d'un même traceur en deux points différents ne permet pas une interprétation différenciée. En d'autres termes, lors de la restitution du traceur en un point de suivi, il n'est pas possible d'en définir l'origine.

Les injections ont été réalisées en fin de journée, début de nuit afin de limiter tout risque de dégradation du traceur par les UV émis par le soleil.

### 2.3. Précautions pour l'injection et l'échantillonnage

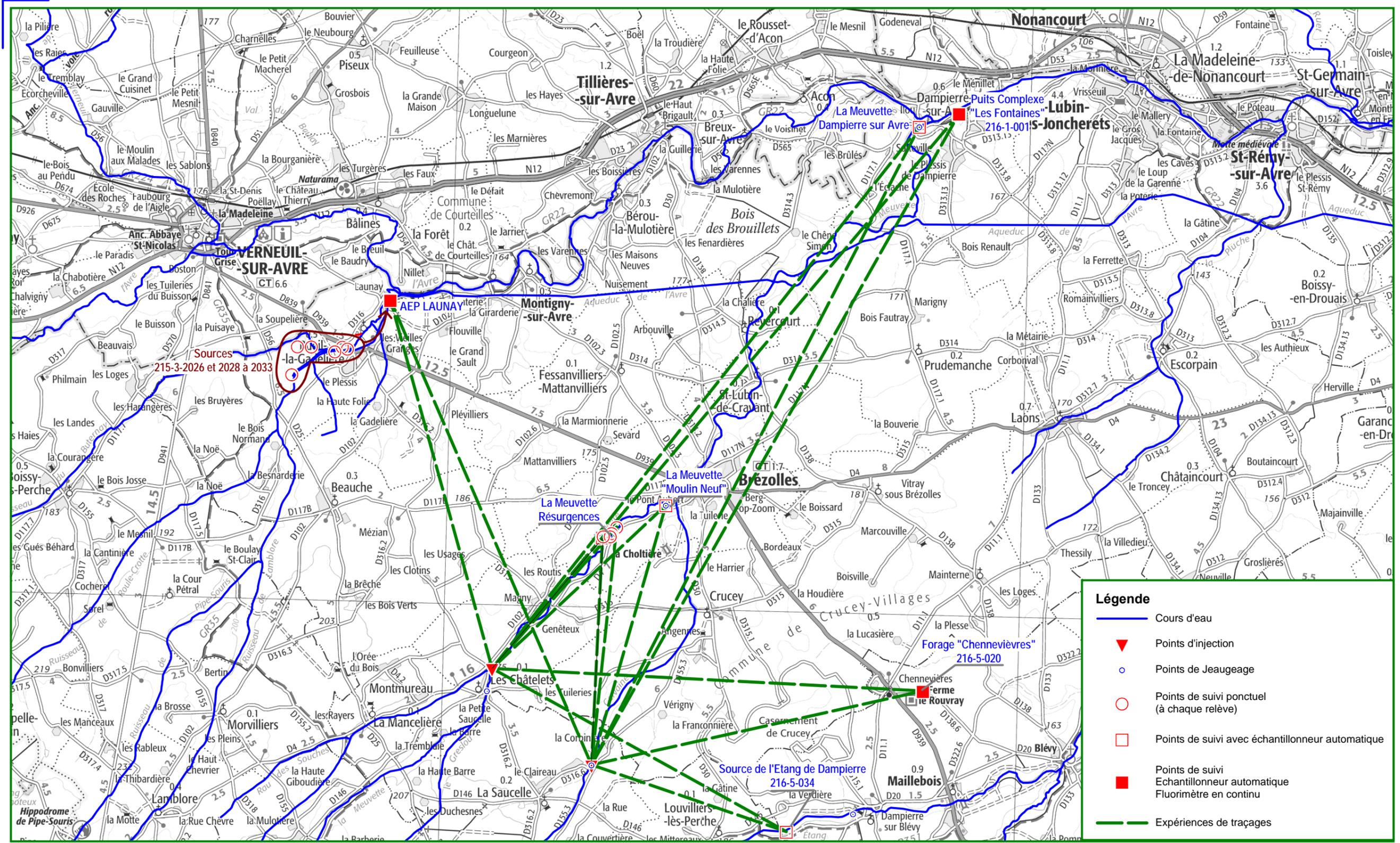
Parmi toutes les précautions habituellement prises pour effectuer une opération de traçage dans les règles de l'art, il convient de rappeler notamment :

- la mise en place du protocole de suivi en continu par les fluorimètres de terrain avant l'injection du traceur
- le prélèvement des blancs avant l'injection
- l'utilisation d'un véhicule dédié pour le transport du traceur
- le prélèvement des échantillons par une personne n'ayant été en contact, ni de près ni de loin, avec le traceur

## 2.4. Points et mode de suivi

Le tableau ci-dessous présente les coordonnées des points de suivi, les modes de suivi ainsi que le nombre d'analyse effectuées au laboratoire du CETRAHE par l'équipe de Névila JOZJA. Les résurgences ont été localisées quelques jours seulement avant les injections.

Point de suivi	Indice BSS	Lambert II		Z (m NGF)	Distance au point d'injection (km)		Remarques	Mode de suivi			Durée de suivi (jours)	Échantillons d'eau	Analyses
		X (m)	Y (m)		Meuvette	Gervaine		Manuel Ponctuel à chaque relève	Préleveur automatique 24 flacons	Préleveurs automatique et Fluorimètre en continu			Naphtionate de Sodium
Sce d'Erigny	215-3-2026	498 631	2 413 869	155	7.9	10.8	Echantillonnages ponctuel à chaque relève	X			40	7	7
Sce de Rivière	215-3-2033	499 402	2 413 829	152	7.5	10.3	Exhaure commune AEP LAUNAY Echantillonnages ponctuel à chaque relève	X			40	7	-
Sce de Graviers	215-3-2031	499 132	2 413 769	154	7.6	10.4		X			40	7	-
Sce de Foisys	215-3-2032	499 292	2 413 809	152	7.5	10.3		X			40	7	-
Sce du Blaon	215-3-2030	498 332	2 413 388	155	7.6	10.5		X			40	7	-
Sce Ganderolles	215-3-2029	498 217	2 413 273	157	7.6	10.5		X			40	7	-
Sce du Chêne	215-3-2028	498 217	2 413 253	165	7.6	10.5		X			40	7	-
AEP LAUNAY	-	500 312	2 414 876	148	8.2	10.8		-		X		40	168
AEP « Chennevière »	216-5-020	511 762	2 406 620		9.2	7.3	Prélèvement par pompe SQ2 en continu Modification du lieu de rejet suite à demande du propriétaire riverain Fluorimètre en continu fonctionnel quelques jours après les injections			X	40	168	38
AEP Dampierre	216-1-001	512 435	2 418 951		15.5	16.0	-		X		40	164	59
Meuvette Moulin Neuf	-	506 236,5	2 410 541,5	153	5.1	5.8	Relève n° 5 : Tuyau de prélèvement débranché Relève n°6 : Batterie débranchée		X		40	129	75
Meuvette Dampierre sur Avre	-	511 580	2 418 680	116	14.7	15.3	-		X		40	168	33
Sce de l'Etang Dampierre sur Blévy	216-5-034	508 868	2 403 582	164	7.2	4.4	Appareil vandalisé au cours de la relève n°6 notamment (Vol de la batterie)		X		40	146	17
Résurgences sur la Meuvette	-	504 886 à 505 189	2 409 841 à 2 410 067	159	3.6 à 4.0	4.8 à 5.1	5 résurgences sur la Meuvette en amont du moulin neuf	X			40	25	25
Meuvette Amont Résurgences	-	504 886	2 409 841	159	3.6	4.8	A sec à partir du 17-18/7/2013		X		40	77	20
<b>TOTAL</b>											40	1094	315



**Légende**

- Cours d'eau
- Points d'injection
- Points de Jeaugeage
- Points de suivi ponctuel (à chaque relèvement)
- Points de suivi avec échantillonneur automatique
- Points de suivi Echantillonneur automatique Fluorimètre en continu
- Expériences de traçages

Echelle : 1/80 000

Figure 1 : Description de l'expérience



### 3. Planning d'intervention

Ci-dessous le planning des échantillonnages.

Tâches	Date	Pas de temps entre prélèvements (h)	Nbre prélèvement par échantillon	Durée entre chaque relève (h)
Injection + lancement suivi	15/07/2013	1:00	1	24:00
Relève n°1	16/07/2013	1:00	1	24:00
Relève n°2	17/07/2013	1:00	1	24:00
Relève n°3	18/07/2013	4:00	1	96:00
Relève n°4	22/07/2013	8 :00	1	192 :00
Relève n°5	30/07/2013	13 :00	1	312 :00
Relève n°6	11/08/2013	14 :00	1	336 :00
Relève n°7 Dépose matériel	25/08/2013	-	-	-

**Tableau 1 : Planning des échantillonnages**

Au total, 7 séries de 24 échantillons ont été prélevées sur les points suivis par un échantillonneur automatique.

Les séries 5 et 6 sur la Meuvette au Moulin neuf sont incomplètes. Le tuyau d'aspiration puis la batterie ont été débranché.

Suite au vol de la batterie, vraisemblablement le 2/8/2013 après 17h30, la série 6 à la source de l'étang de Dampierre sur Blévy comprends 7 échantillons sur 24.

Au total 1 094 échantillons ont été prélevés lors de cette expérience.

L'ensemble des échantillons a été prélevé par du personnel n'ayant jamais été mis en contact, ni de près ni de loin, avec le traceur, ni au moment de sa préparation, ni au moment du transport, ni au moment de l'injection. Le transport du traceur a été effectué par des véhicules dédiés. Enfin, lors des échantillonnages les précautions suivantes sont été prises :

- utilisation de gants jetables, changés à chaque nouveau point de suivi
- rinçage systématique de chaque flacon avec l'eau du prélèvement à réaliser

## 4. Résultats et interprétations

### 4.1. Résultats des jaugeages

Le tableau ci-dessous rassemble les résultats des jaugeages effectués. On se reportera à l'annexe 1 qui présente le détail des mesures effectuées.

N°	Lieux	Date	Vitesse (m/s)	Section hydraulique (m <sup>2</sup> )	Débit (l/s)
1	Gervaine en amont de l'injection	15/07/2013	-	-	Quelques l/s
		22/07/2013	-	-	A sec
2	Meuvette en amont du point d'injection (2 bras sous RD)	22/07/2013	0,195	0,06	11,7
		22/07/2013	0,121	0,0044	0,5
		Total Meuvette amont injection			12,2
3	Amont des résurgences	22/07/2013	-	-	A sec
4	Meuvette au Moulin Neuf	22/07/2013	0,062	2,47	153,1
5	Gervaine en amont de la confluence avec la Meuvette	22/7/2013	-	-	A sec
6	Meuvette à Dampierre sur Avre	16/07/2013	0,028	1,89	52,9
	Aval Etang de Dampierre sur Blévy	22/07/2013	0,159	3,075	488,9

**Tableau 2 : Résultats des jaugeages**

Les injections sur la Meuvette et la Gervaine se sont déroulées alors que les rivières étaient en cours de tarissement au niveau des points d'injection.

On se reportera à la figure 2 page suivante pour la localisation des points de jaugeages sur la Meuvette et la Gervaine.

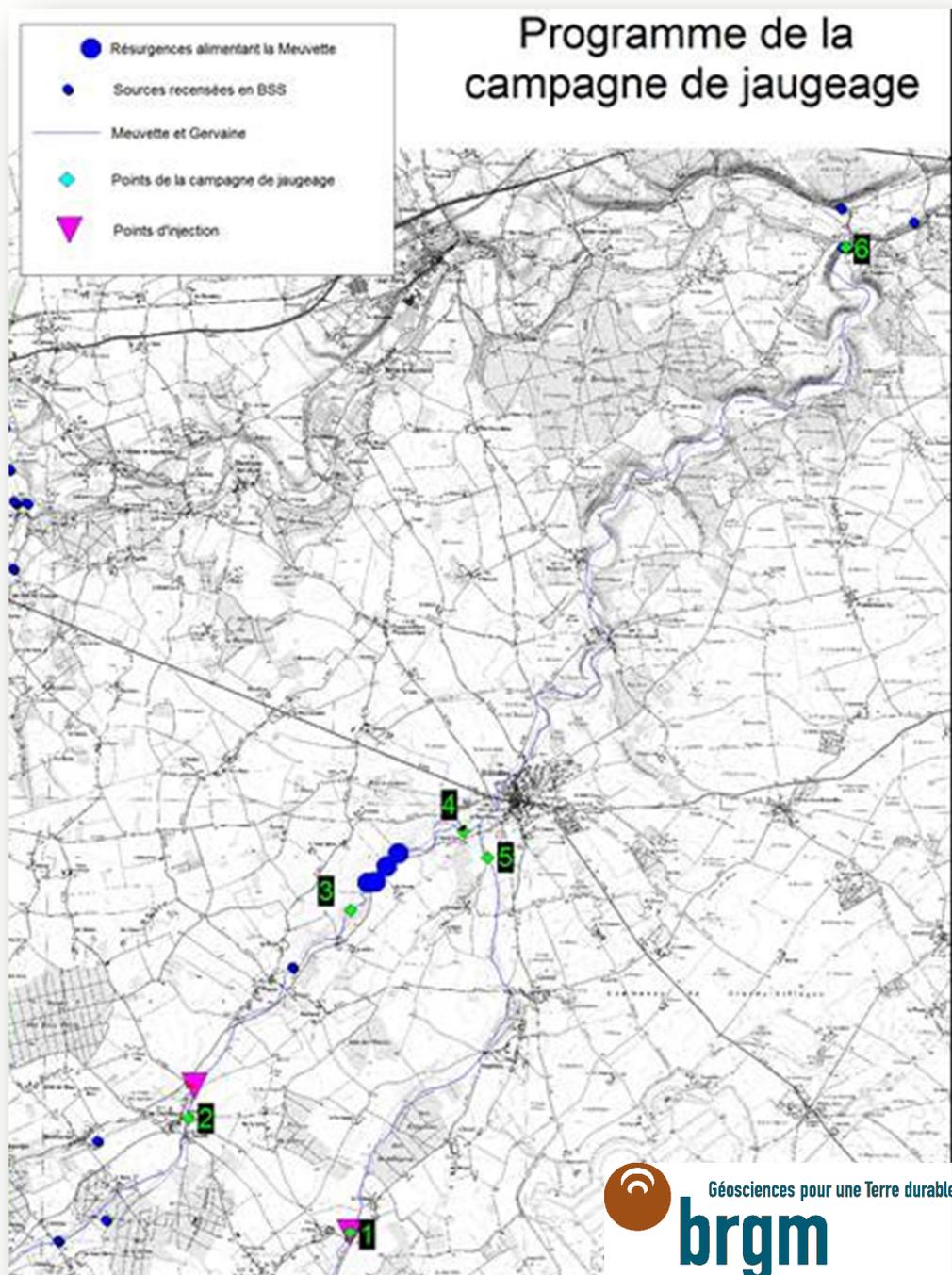


Figure 2 : Implantation des points de jaugeage

## 4.2. Résultats des suivis des hauteurs et des vitesses

Un capteur de pression et de vitesse a été installé aux points suivant :

- Meuvette au Moulin Neuf (point n°4)
- Meuvette à Dampierre sur Avre (point n°6)
- Aval Etang de Dampierre sur Blévy

A chaque relève, le débit en amont de l'étang de Dampierre sur Blévy était nul. Le débit à l'aval de l'étang correspondait donc au débit de la source de l'étang elle-même.

Alors que les 3 sondes et leurs logger ont été configurés de la même manière, seules les hauteurs ont été enregistrées sur la Meuvette à Dampierre sur Avre et à l'Aval de l'Etang.

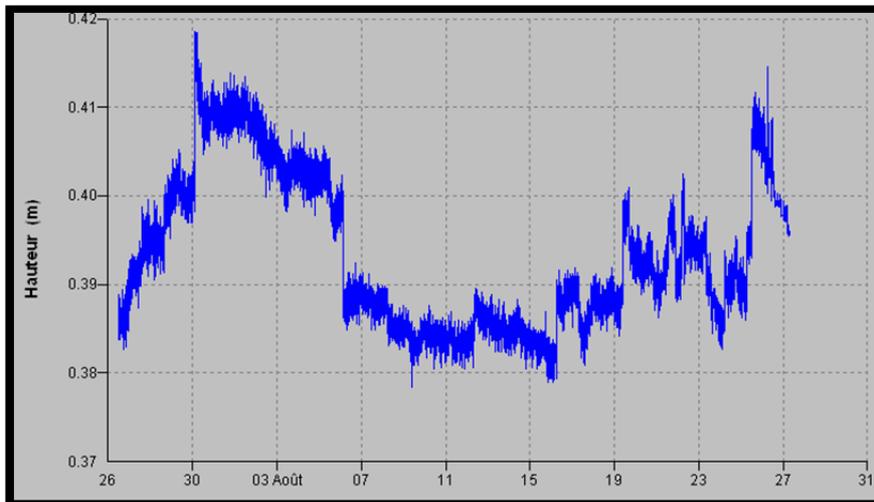


Figure 3 : suivi des hauteurs à l'aval de l'étang de Dampierre sur Blévy

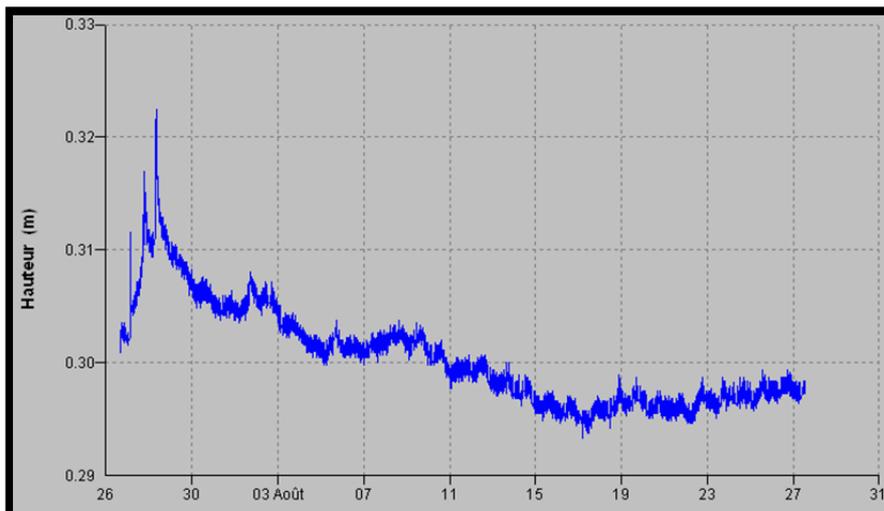
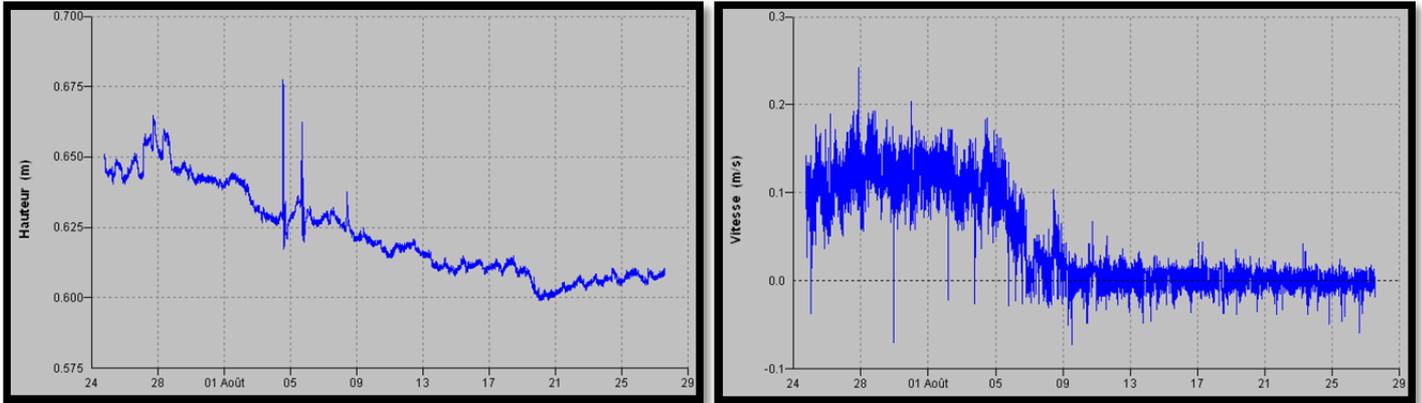


Figure 4 : suivi des hauteurs sur la Meuvette à Dampierre sur Avre

Les hauteurs et les débits nous sont connus sur la Meuvette au Moulin Neuf.

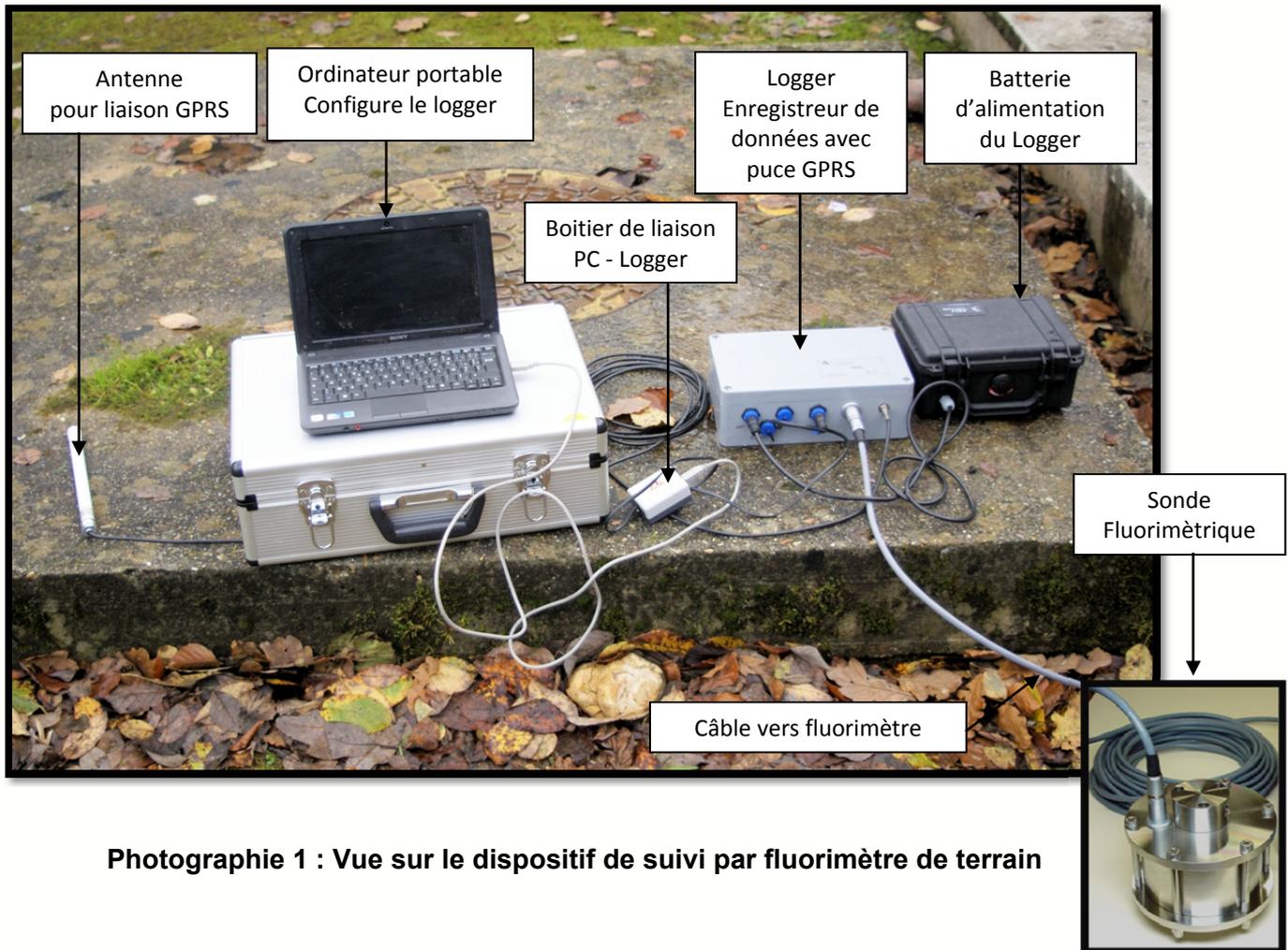


**Figure 5 : Suivi des hauteurs et des vitesses sur la Meuvette au Moulin Neuf**

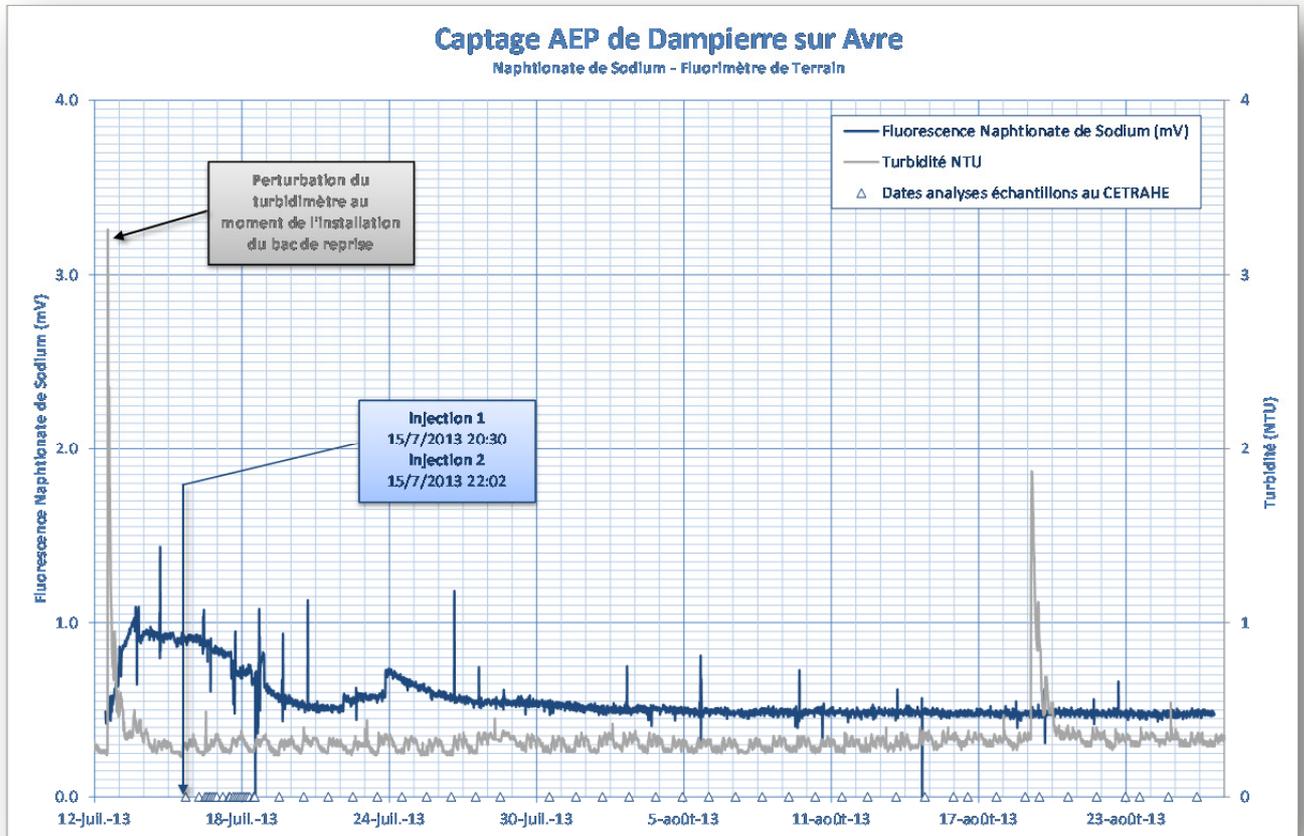
### 4.3. Résultats des suivis au fluorimètre de terrain

Les captages AEP de chenervièvres à Dampierre sur Blévy, de Dampierre sur Avre et de Launay ont été équipés d'un système de suivi par fluorimètre de terrain.

La prise de vue ci-dessous présente le principe de son fonctionnement.



4.3.1. Suivi au Forage de Dampierre sur Avre - AEP 216-1-001



**Figure 6 : Fluorescence au Forage de Dampierre sur Avre**

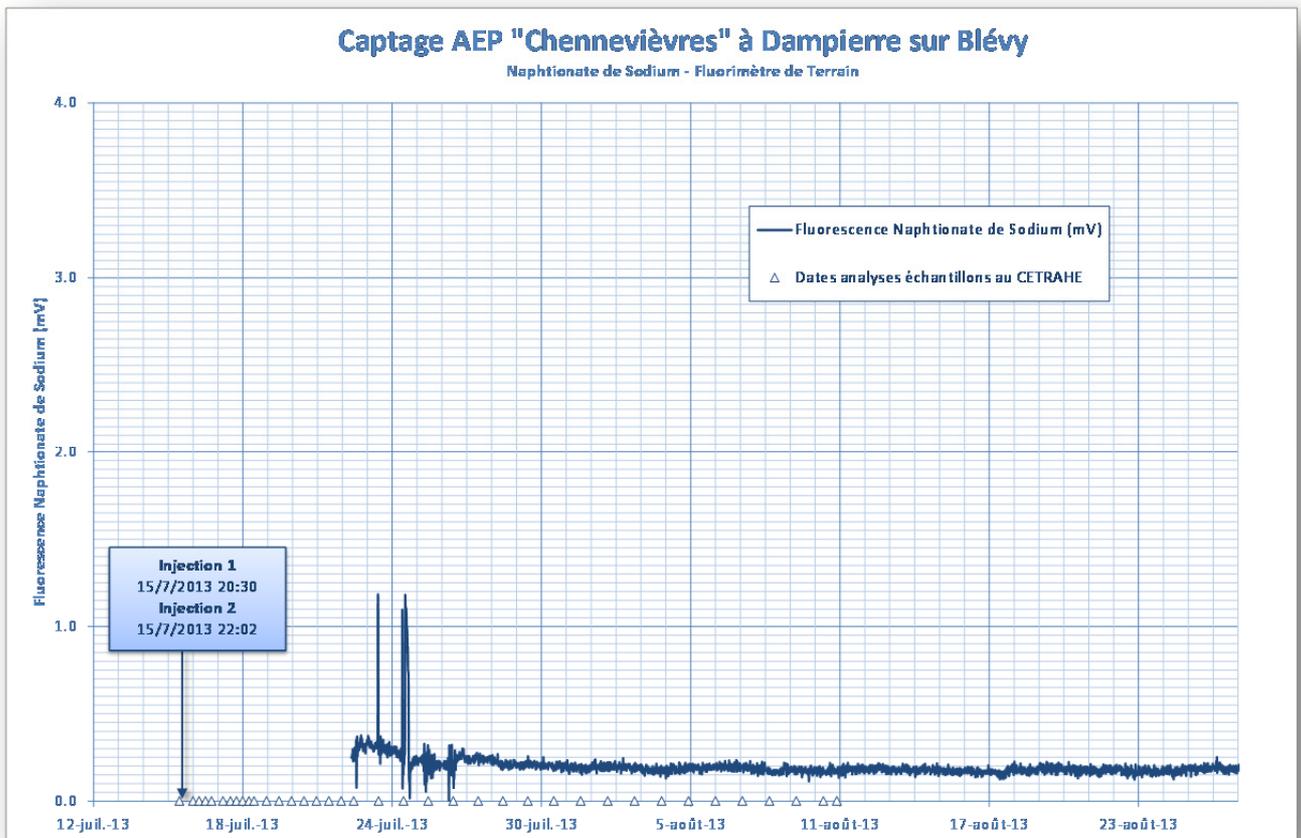
Durant toute la durée du suivi au forage de Dampierre sur Avre, la fluorescence mesurée par le fluorimètre de terrain est restée inférieure à celle d'avant l'injection.

L'exploitation du forage a suivi son rythme habituel avec pompage alternativement sur les pompes P1 et P2. D'après les relevés des compteurs fournis par l'exploitant, la durée de pompage a été de 122 h pour P1 et 191 h pour P2, soit un rythme journalier d'environ 8 h par jour.

Les analyses au laboratoire du CETRAHE ont confirmé l'absence de Naphtionate de Sodium.

Aucune restitution de Naphtionate de Sodium n'a été constatée durant les 40 jours de suivi au Forage de Dampierre sur Avre (216-1-001).

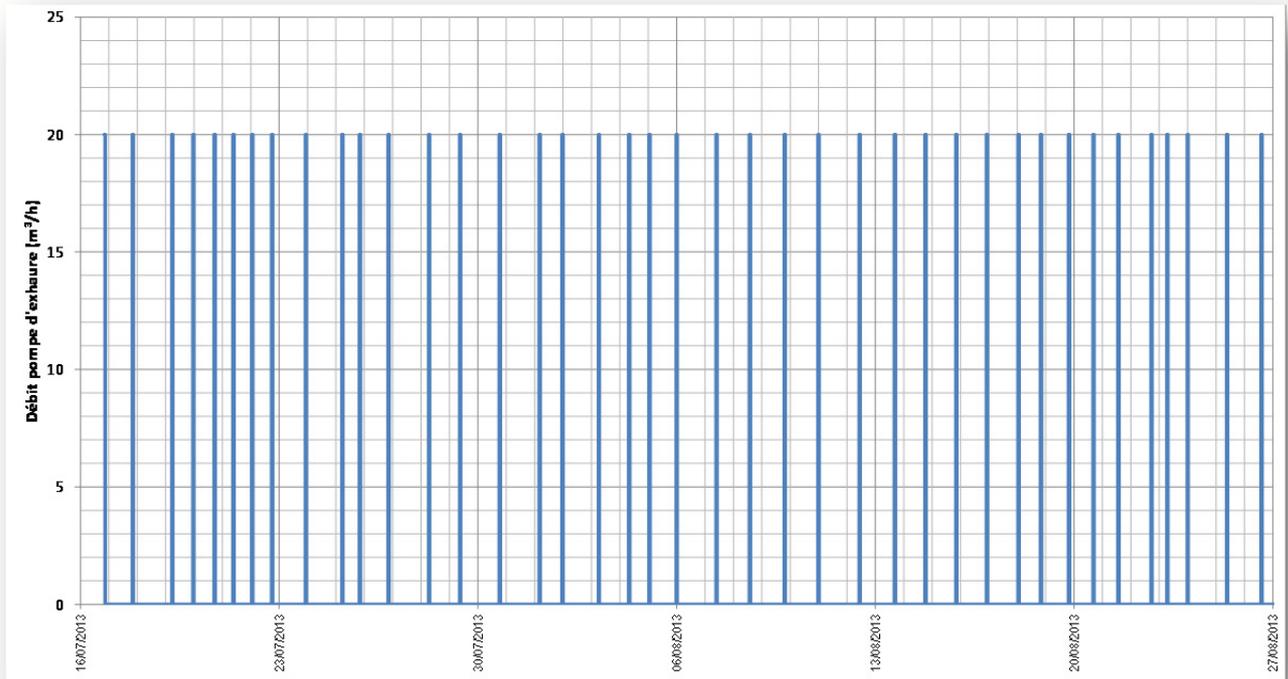
## 4.3.2. Suivi au Forage de « Chennevières » - AEP 216-5-020



**Figure 7 : Fluorescence au Forage de « Chennevières »**

Suite à un problème d'alimentation électrique du fluorimètre de terrain, l'enregistrement de la fluorescence a été effectif à partir du 22/07/2013. Les prélèvements à l'échantillonneur automatique ont permis de suivre la fluorescence durant cette période.

C'est à cette période que le propriétaire de la parcelle limitrophe au périmètre de protection immédiate, vers laquelle les eaux pompées, par une pompe installée par nos soins, étaient initialement dirigée, s'est plaint du risque de pertes de cultures. Les eaux pompées vers le bac de reprise ont donc été réinjectées dans l'ouvrage lui-même.



**Figure 8 : Rythme de pompage au forage de Chennevières**

Lors de la durée de l'expérience, le rythme de pompage de la pompe d'exhaure en place se résume en moyenne à une à 2 phases de pompages par jour à 20 m<sup>3</sup>/h durant 45 minutes environ. Au total 1 650 m<sup>3</sup> ont été prélevés via cette pompe soit un débit moyen de 1,6 m<sup>3</sup>/h.

En plus de cette pompe, nous avons installé une pompe de type SQ2 dont le débit était de 40 l/min soit 2,4 m<sup>3</sup>/h. Elle a fonctionné en continu.

Durant toute la durée du suivi, aucune variation significative de la fluorescence n'a été observée. Les analyses effectuées au laboratoire du CETRAHE confirment l'absence de Naphtionate de Sodium.

Aucune restitution de Naphtionate de Sodium n'a été constatée durant les 40 jours de suivi au Forage de « Chennevière » - AEP 216-5-020.

4.3.3. Suivi au captage de Launay

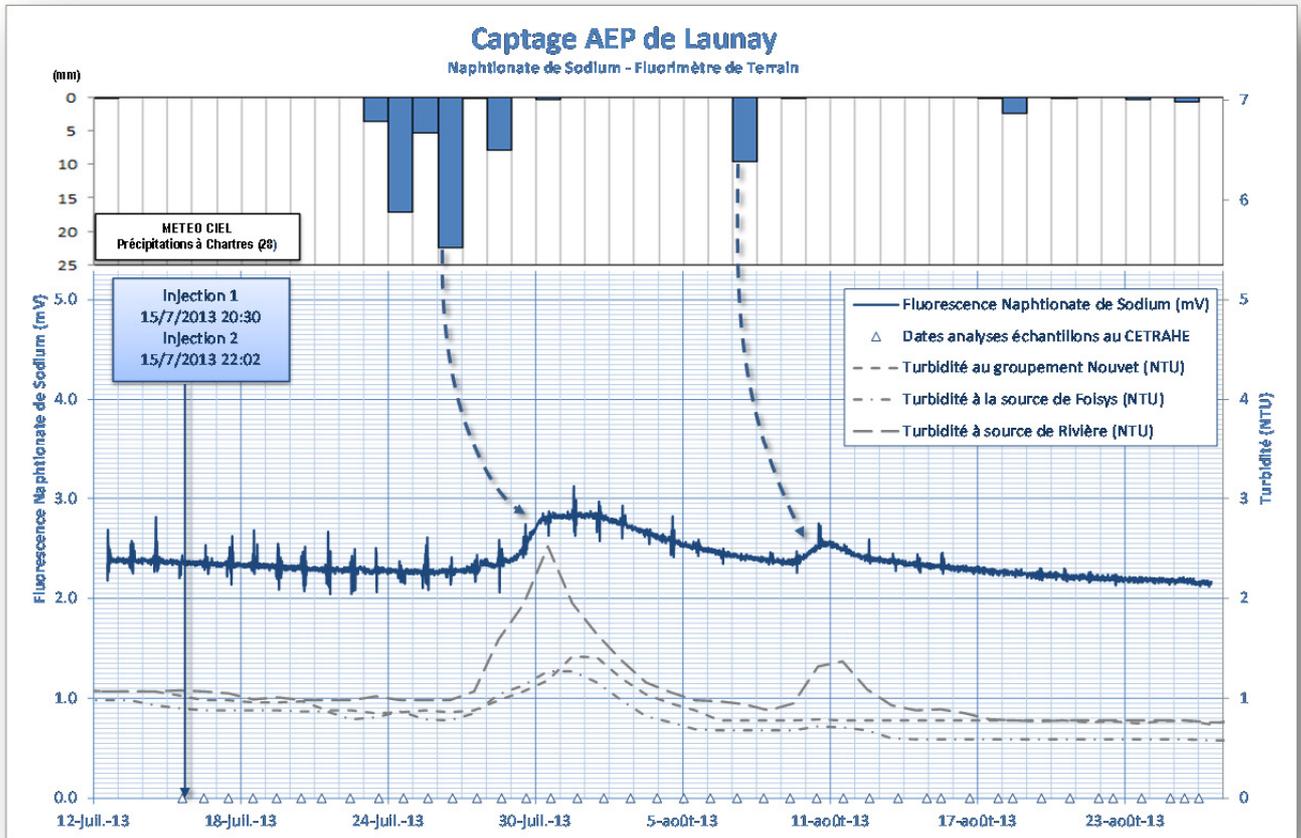


Figure 9 : Fluorescence au captage de Launay.

Au cours de la période de suivi de 40 jours, 2 pics de fluorescence sont visibles au captage de LAUNAY qui collecte l'eau de 6 sources (Sources de Rivière, Gravier, Folsys, Blaon, Ganderolles et du Chêne). Que ce soit celui du 30 juillet ou du 10 août, ils sont tous les deux directement en relation avec 2 pics de turbidité consécutifs à 2 épisodes orageux. Ces pics de fluorescence sont donc le symptôme d'arrivée d'eau chargée en Matières En Suspension (MES) et de matières organiques dont la fluorescence est proche de celle du Naphtionate de Sodium. Les analyses effectuées en laboratoire confirment l'absence de Naphtionate de Sodium.

Aucune restitution de Naphtionate de Sodium n'a été constatée durant les 40 jours de suivi au captage de LAUNAY.

Il en est de même pour la source d'Erigny dont les eaux n'aboutissaient pas au captage de Launay. Des prélèvements manuels ont été effectués et analysés en laboratoire. Il n'a pas été détecté de Naphtionate de Sodium.

#### 4.4. Résultats des suivis avec échantillonneur automatique

On se reportera à l'Annexe 3 qui présente les résultats des analyses effectuées au laboratoire du CETRAHE.

##### 4.4.1. Suivi à la source de l'étang de Dampierre sur Blévy

Aucune trace de Naphtionate de Sodium n'a été observée sur les échantillons analysés à la source de l'étang de Dampierre sur Blévy.

##### 4.4.2. Suivi sur la Meuvette à Dampierre sur Avre

Aucun passage de Naphtionate de Sodium sur la Meuvette n'a été constaté au point de suivi de Dampierre sur Avre.

##### 4.4.3. Suivi sur la Meuvette au Moulin Neuf et les résurgences amont

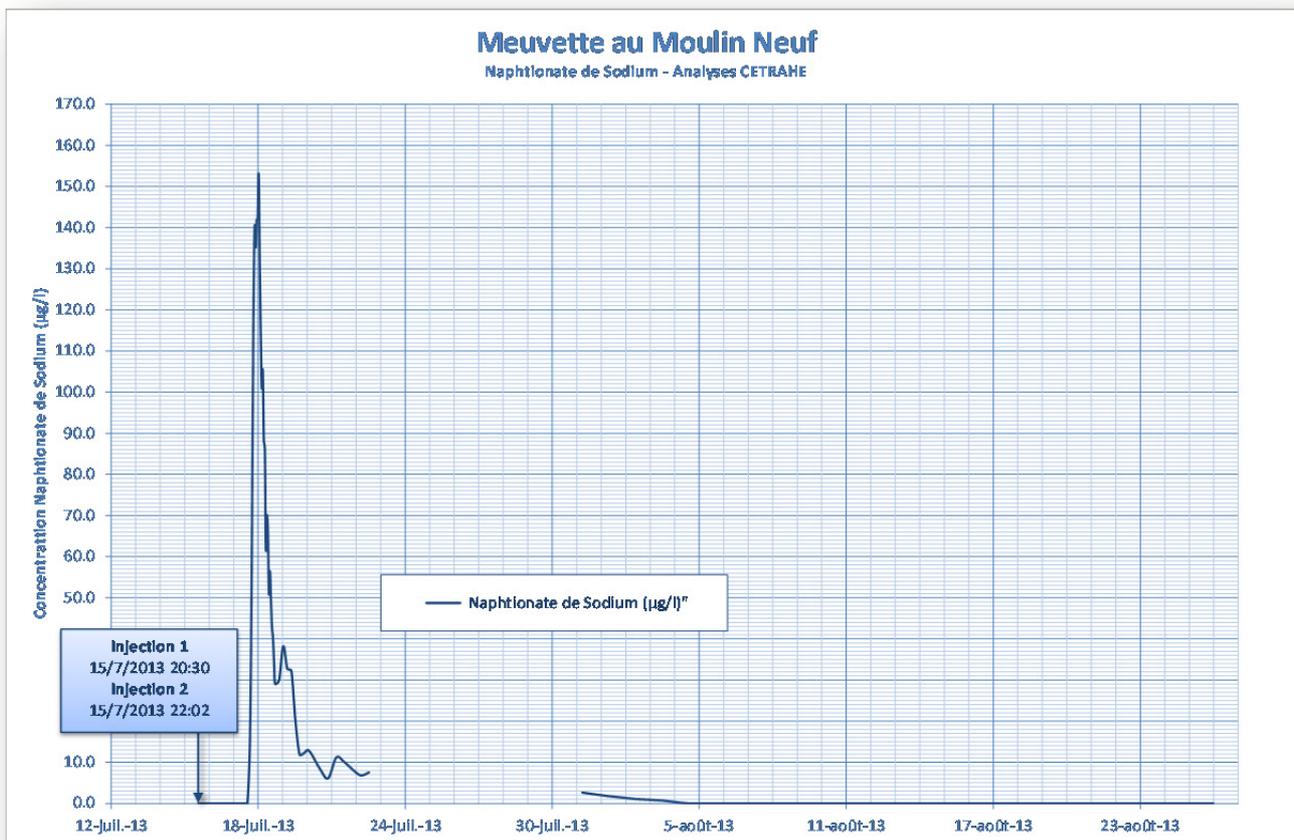
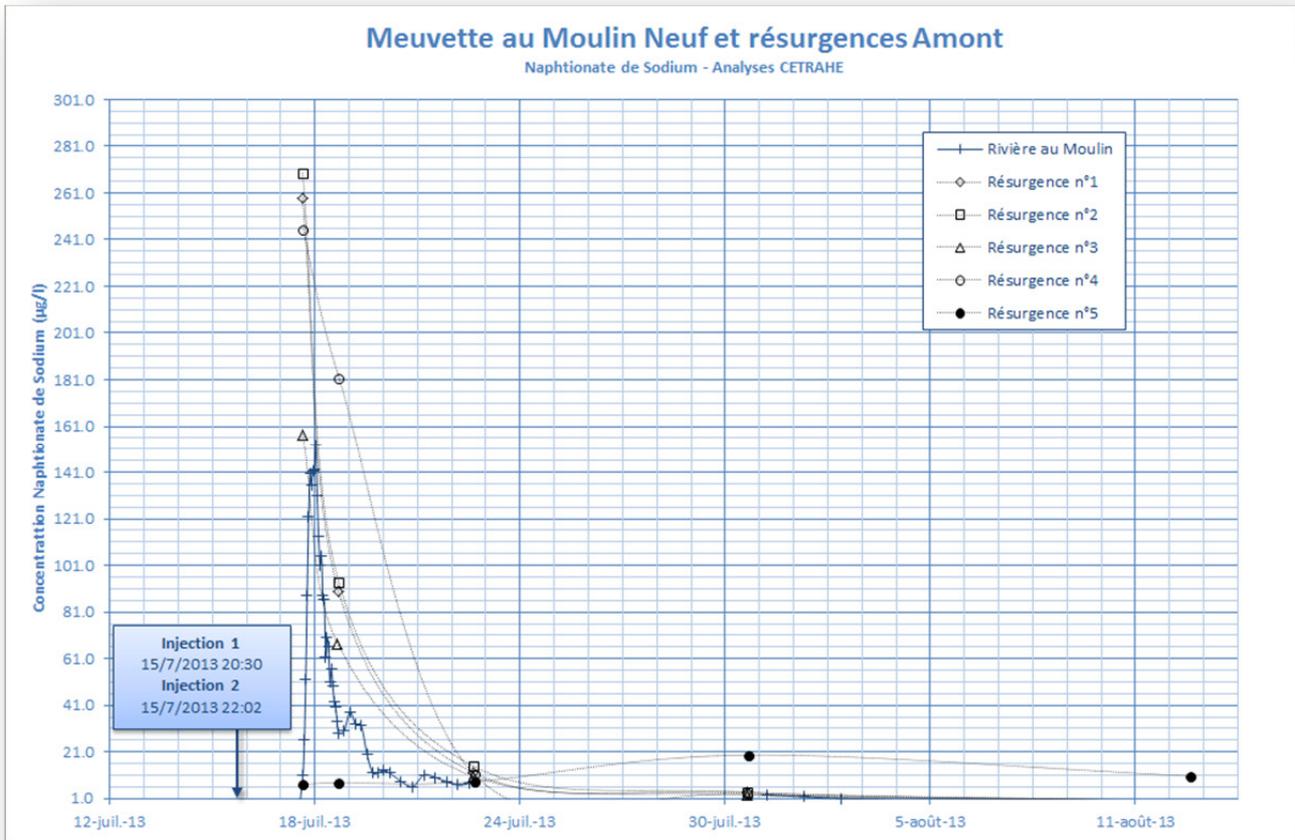


Figure 10 : Concentrations en Naphtionate de Sodium sur la Meuvette au Moulin Neuf

Une restitution plurimodale a été constatée sur la Meuvette au droit du Moulin Neuf dès le 17 juillet 2013. D'après le témoignage Patrick VALLON du SIVA, une coloration bleutée de la rivière était visible en amont au niveau des résurgences.

La figure page suivante présente cette restitution et les analyses effectuées lors des prélèvements ponctuels aux résurgences.



**Figure 11 : Concentrations en Naphthionate de Sodium sur la Meuvette au Moulin Neuf et sur les résurgences en amont**

Sur le graphique ci-dessus les résurgences sont numérotées de l'aval vers l'amont, en s'éloignant du point de prélèvement sur la Meuvette au Moulin Neuf.

Il est difficile, voire impossible, de corréliser dans le détail les variations de concentrations aux résurgences et au droit du Moulin Neuf, faute de suffisamment de mesures sur les résurgences elles-mêmes. Il semble toutefois que les différents pics sur la Meuvette au Moulin Neuf puissent s'expliquer par les arrivées décalées aux différentes résurgences. La résurgence la plus amont semble se comporter différemment des 4 autres. Le tarissement de la rivière en amont des résurgences a provoqué une flaque au niveau de la résurgence la plus amont. En l'absence de séries complètes sur la Meuvette au Moulin Neuf (séries 5 et 6) ; il ne nous est pas possible d'en dire davantage à ce sujet. La fin de la restitution intervient lors de la série 7.

La date exacte du tarissement de la rivière en amont des résurgences n'est pas connue avec précision. Elle a dû intervenir autour du 17 juillet. Il semble bien que la restitution au Moulin Neuf soit intervenue après tarissement de la Meuvette en amont des résurgences. La restitution du Naphthionate de Sodium sur la Meuvette au Moulin Neuf serait donc consécutive uniquement au transit souterrain du traceur depuis les points d'injection, sans pouvoir distinguer lequel, avec retour en surface via les résurgences.

## 4.5. Exploitation et présentation des résultats

### 4.5.1. Méthode d'interprétation quantitative

Ce chapitre est extrait du Guide d'interprétation des traçages.

A partir des représentations des concentrations en traceur en fonction du temps, on peut déterminer des paramètres simples du transit comme :

- Le temps de transit minimum «  $t_{\min}$  » correspondant au temps écoulé entre l'heure de l'injection et l'heure où la première apparition du traceur est constatée à l'exutoire,
- La durée de la restitution correspondant à la différence du temps écoulé entre l'heure de la première apparition du traceur ( $t_{\min}$ ) et l'heure de la disparition du traceur dans l'eau ( $t_{\max}$  = moment où les concentrations s'apparentent au bruit de fond),
- Le temps modal de transit «  $t_m$  », donné par la différence entre l'heure d'injection et l'heure d'observation du maximum de concentration.

En prenant la distance horizontale la plus courte parcourue par le traceur entre le point d'injection et le point de restitution que l'on nomme la distance apparente «  $L_a$  » on peut en déduire :

- La vitesse maximale de transit :  $V_{\max} = L_a/t_{\min}$ ,
- La vitesse modale de transit :  $V_m = L_a/t_m$ .

A partir de la courbe de restitution on peut tracer la restitution normée ou « restitution unitaire » correspondant à la répartition de la concentration que l'on aurait pu observer si la masse injectée correspondait à l'unité :

$$R_u(t) = \frac{C(t)}{M_i}$$

- Où  $R_u(t)$  est la restitution unitaire (unité  $L^{-3}$ ),  
 $C(t)$  est la concentration (unité  $M \cdot L^{-3}$ )  
 $M_i$  la masse de traceur injectée (unité M).

Le maximum de cette restitution normée, que l'on peut appeler  $C_{u,\max}$ , correspond à la dilution minimale observée à l'exutoire.

La maîtrise des débits au point de restitution permet de calculer un bilan de restitution (Masse restituée, pourcentage de restitution). Ce bilan de restitution est obtenu à partir de la courbe de flux dont l'expression est la suivante :

$$\Phi(t) = Q(t)C(t)$$

Où  $\Phi(t)$  est le flux (unité  $M \cdot T^{-1}$ ),  
 $Q(t)$  est le débit (unité  $L^3 \cdot T^{-1}$ ),  
 $C(t)$  est la concentration (unité  $M \cdot L^{-3}$ ).

La masse restituée est alors donnée par l'expression :

$$M_r = \int_0^{+\infty} Q(t)C(t)dt$$

Où  $M_r$  est la masse restituée (unité M),  
 $Q(t)$  est le débit,  
 $C(t)$  est la concentration.

Le pourcentage de restitution est obtenu en faisant le rapport entre la masse injectée et la masse restituée :

$$r = \frac{M_r}{M_i} \times 100$$

Où  $r$  est le pourcentage de restitution,  
 $M_r$  la masse restituée,  
 $M_i$  la masse injectée.

On peut également calculer des volumes d'eau caractéristiques du système traçage :

$$V_i = \int_0^{t_{min}} Q(t)dt$$

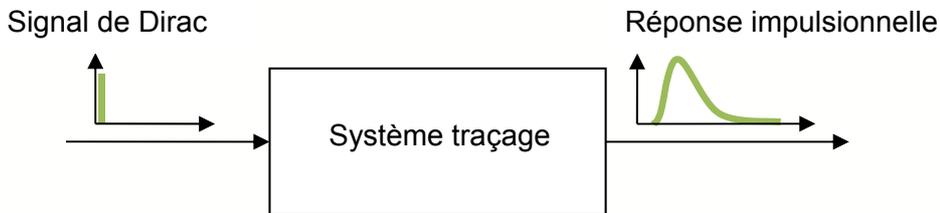
Où  $V_i$  est le volume d'eau passé à l'exutoire avant la première apparition de traceurs (unité  $L^3$ ),  
 $t_{min}$  est le temps avant l'apparition du traceur (unité T),  
 $Q(t)$  est le débit (unité  $L^3 \cdot T^{-1}$ ).

$$V_r = \int_{t_{min}}^{t_{max}} Q(t)dt$$

Où  $V_r$  est le volume d'eau écoulé à l'exutoire au cours de la restitution du traceur ;  
c'est le volume d'eau tracé (unité  $L^3$ ),  
 $t_{min}$  est le temps avant l'apparition du traceur,  
 $t_{max}$  est le temps au bout duquel le traceur n'est plus présent à l'exutoire,  
 $Q(t)$  est le débit.

L'approche systémique des traçages a permis d'adapter aux traçages hydrologiques et en milieu karstique, les concepts développés en génie chimique (Gaillard, 1976 ; Guizerix & al, 1970 ; Molinari, 1976).

La réponse impulsionnelle (fonction de transfert) de ce système traçage correspond à la fonction de sortie pour une fonction d'entrée de très courte durée et d'une amplitude égale à l'unité (signal de Dirac).



**Figure 12 : Approche systémique des traçages**

La Distribution des Temps de Séjours (DTS) permet de décrire le transit du traceur dans le système traçage. Elle correspond à la fonction de densité de probabilité qui donne la probabilité qu'a une molécule de traceur de séjourner dans le système durant un temps compris entre  $t$  et  $t+dt$ . C'est la courbe de distribution du nuage de traceur. L'expression de la DTS est la suivante :

$$h(t) = \frac{C(t)Q(t)}{\int_0^{+\infty} C(t)Q(t)dt}$$

où  $h(t)$  est la DTS (unité  $T^{-1}$ ),  
 $C(t)$  est la concentration en fonction du temps,  
 $Q(t)$  est le débit au point de restitution.

La DTS n'est en fait rien d'autre que l'expression du flux de traceur normé par rapport à la masse de traceur restituée. Elle peut également s'écrire :

$$h(t) = \frac{\Phi(t)}{M_r}$$

où  $h(t)$  est la DTS (unité  $T^{-1}$ ),  
 $\Phi(t)$  est le flux en traceur en fonction du temps (unité  $M \cdot T^{-1}$ ),  
 $M_r$  est la masse restituée (unité  $M$ ).

De ce fait :

$$\int_0^{+\infty} h(t)dt = 1$$

Si le débit est constant durant l'opération de traçage, la DTS peut être calculée sans avoir besoin de mesurer ce dernier. Ceci est très pratique dans le cas où le débit de l'exutoire surveillé n'est pas mesurable compte tenu des conditions d'émergence.

Lorsque l'injection peut être assimilée à une impulsion de Dirac (injection courte devant le temps de la restitution), la DTS donne la réponse impulsionnelle du système-traçage pour les conditions hydrologiques dans lequel il se trouve au moment du traçage (M.Lepiller & P.H.Mondain – 1986).

A partir de la DTS on peut calculer un certain nombre de paramètres décrivant le transit du traceur au sein du système-traçage. Comme toute distribution statistique la DTS peut être décrite par des moments du temps qui caractérisent la répartition du nuage de traceur.

Le moment d'ordre 1 correspond au temps moyen de transit (de séjour) ou espérance mathématique de la distribution. Il correspond à l'abscisse du centre de gravité du nuage de traceur :

$$\bar{t} = \int_0^{+\infty} t h(t) dt$$

où  $\bar{t}$  est le temps moyen de transit (unité T),  
t est le temps,  
h(t) est la DTS.

Les moments d'ordre 2, 3 et 4 peuvent également être calculés et fournir des paramètres complémentaires pour décrire la DTS : coefficient de variation, coefficient d'asymétrie et coefficient d'aplatissement (Dreiss et Dzikowski in Marsaud – 1997).

Le temps de moyen de transit permet calculer la **vitesse apparente** de transit :

$$v_{app} = \frac{L_a}{\bar{t}}$$

où  $v_{app}$  est la vitesse apparente (unité L . T<sup>-1</sup>),  
 $\bar{t}$  est le temps moyen de transit,  
 $L_a$  est la distance horizontale la plus probable parcourue par le traceur entre les points d'injection et de suivi.

Cette **vitesse apparente** est une caractéristique du déplacement du nuage de traceur dans son ensemble. Elle caractérise le transport hydraulique du traceur. Il ne faut pas la confondre avec la vitesse moyenne de transit qui rend compte du déplacement de chaque molécule de traceur :

$$\bar{v} = L_a \int_0^{+\infty} \frac{1}{t} h(t) dt$$

où  $\bar{v}$  est la vitesse moyenne de transit (unité L . T<sup>-1</sup>),  
h(t) est la DTS,  
 $L_a$  est la distance horizontale en ligne droite entre le point d'injection et de suivi.

Enfin il peut être intéressant de calculer le volume d'eau parcouru par le traceur. Ce volume peut-être assimilé au volume du système traçage. Il est également connu sous le nom de volume de Allen (Allen 1923 in Guizerix & Margrita, 1976). Ce volume se calcule de la façon suivante :

$$V_a = \int_0^{\bar{t}} Q(t) dt$$

où  $V_a$  est le volume de Allen (unité  $L^3$ ),  
 $\bar{t}$  est le temps moyen de séjour,  
 $Q(t)$  est le débit à l'exutoire.

A partir de ce volume on peut calculer une section moyenne du système-traçage :

$$S_a = \frac{V_a}{L_a}$$

où  $S_a$  est la section de Allen,  
 $V_a$  est le volume de Allen (unité  $L^3$ ),  
 $L_a$  est la distance horizontale en ligne droite entre le point d'injection et de suivi.

#### 4.5.2. Synthèse des résultats positifs

Seule la restitution sur la Meuvette peut être interprétée. On se reportera à l'annexe 2 qui présente la synthèse cette interprétation.

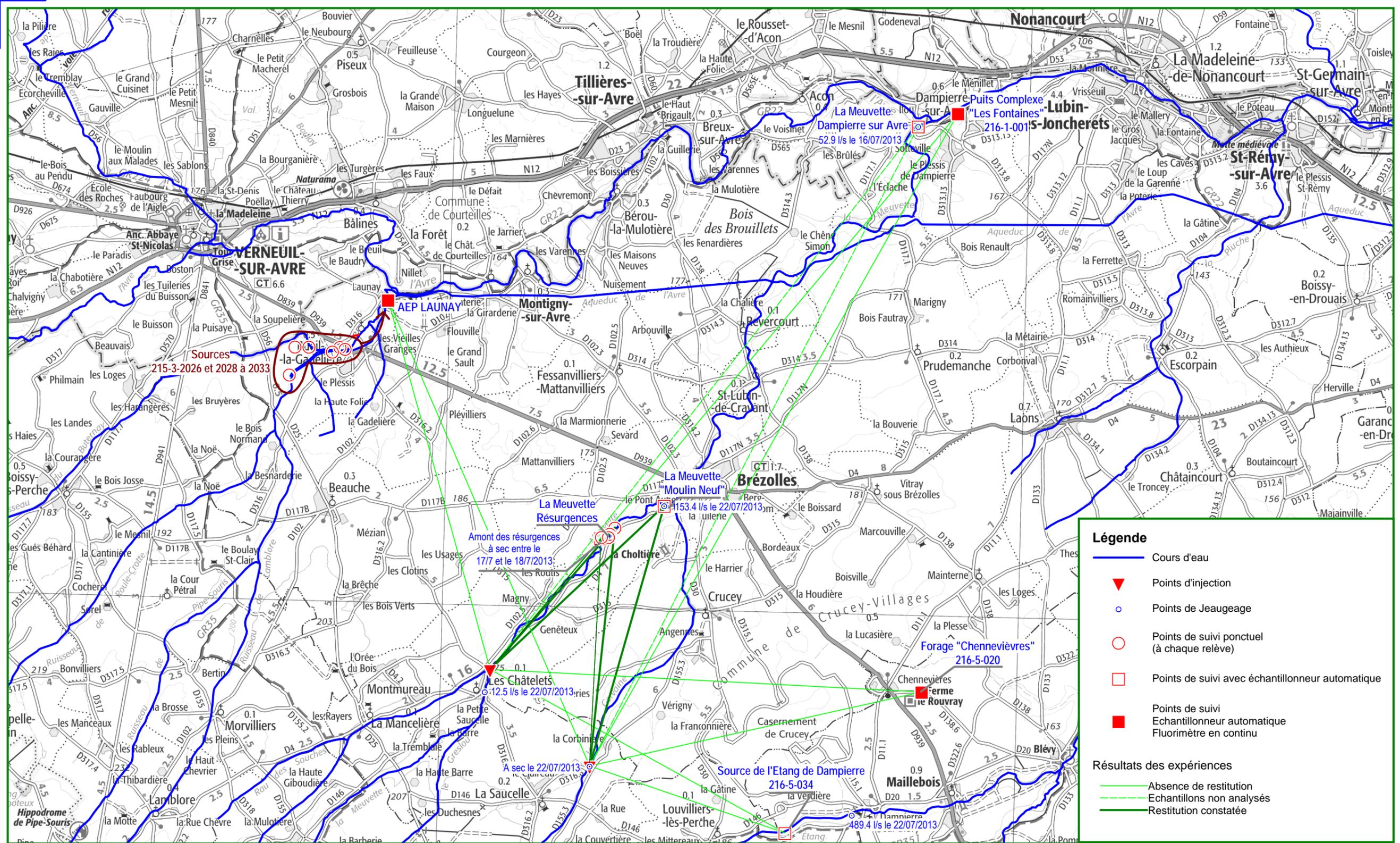
Dans la mesure où il n'est pas possible de distinguer le point d'injection à l'origine de la restitution du traceur, le tableau 3 présente une interprétation à partir de l'un ou de l'autre des 2 points d'injection.

Traceur	Point de restitution	Vitesse maximale de transit (m/h)	Vitesse modale (m/h)	Vitesse moyenne (m/h)	Taux de restitution %	Quantité restituée (g)
Naphtionate de Sodium Injection Meuvette	Meuvette Moulin Neuf	118.2	97.8	84.3	2.63	1.575
Naphtionate de Sodium Injection Gervaine	Meuvette Moulin Neuf	139	114.2	98.2	2.63	1.575

**Tableau 3 : Bilan de Restitution du Naphtionate de Sodium**

Les vitesses de première apparition sont le signe d'un transit par un karst bien développé. Pour expliquer le faible taux de restitution, nous pouvons émettre les hypothèses suivantes :

- le tarissement de la Gervaine n'a pas permis l'injection du traceur vers la zone de pertes ;
- le tarissement de la Meuvette a limité l'injection du traceur vers la zone de pertes.
- le tarissement de la Meuvette n'a pas permis d'observer sa restitution sur la rivière par trajet de surface ;



Echelle : 1/80 000



Figure 13 : Résultats de l'expérience

## 5. Conclusion

L'expérience de traçage qui a consisté à injecter 120 kg de Naphtionate de Sodium répartis en 2 points d'injection, un sur la Meuvette et un sur la Gervaine, et de suivre en particulier sa restitution durant 40 jours aux captages AEP de Dampierre sur Avre, de Dampierre sur Blévy et de Launay a donné des résultats négatifs, tant par suivi en continu au fluorimètre de terrain que par échantillonnage automatique et analyse au laboratoire du CETRAHE.

Seule une restitution d'environ 1,6 kg a été constaté sur la Meuvette, au droit du Moulin Neuf, à l'aval de résurgences localisées peu de temps avant les injections elles-mêmes.

Il semble que cette restitution soit due à un retour en surface du traceur, via ces résurgences, après transit par le milieu souterrain karstifié. Les vitesses maximales de transit sont comprises entre 118 et 139 m/h.

Le faible taux de restitution sur la Meuvette au Moulin Neuf peut s'expliquer notamment par le tarissement de la Gervaine puis de la Meuvette peu de temps après les injections. En effet, la Naphtionate de Sodium n'a pas atteint ce point de suivi par trajet de surface et encore moins le point de suivi sur la Meuvette à Dampierre sur Avre.

On ne peut exclure une restitution à un éventuel point qui n'aurait pas été suivi dans le cadre de cette expérience.

Dans les conditions hydrogéologiques présentes au moment des expériences de traçages, les résultats sur les 2 points de suivi sur la BV de la Blaise n'ont pas montré de connexion karstique entre les BV de l'Avre et de la Blaise.

### **Restriction d'usage du rapport**

Ces informations sont soumises à l'exhaustivité et la fiabilité des documents disponibles et consultables, l'existence d'une information « cachée » ou « erronée » est toujours possible. L'exhaustivité et la véracité absolue ne peut donc être garantie.

Tous les éléments de ce rapport (cartes, photos, pièces et documents divers,...) constituent une seule et même entité indissociable. La responsabilité d'IDDEA ne saurait être engagée par une utilisation, une communication ou une reproduction partielle de ce rapport et ses annexes sans l'accord préalable d'IDDEA.

ANNEXE 1 : DETAIL DES INJECTIONS ET FICHE DE DECLARATION DES  
TRAÇAGES

**FICHE DE DÉCLARATION PRÉALABLE D'UN TRAÇAGE  
EN RÉGION HAUTE-NORMANDIE**

**L'objectif de ce formulaire de déclaration préalable des opérations de traçage est de :**

1. prévenir les organismes chargés de la distribution d'eau potable ainsi que les services de la police de l'eau afin qu'ils puissent gérer au mieux les problèmes liés à ces essais (coloration de l'eau, etc...)
2. tenir un registre des opérations de traçages réalisées en Haute-Normandie afin :
  - > d'éviter les interférences et erreur d'interprétation lorsque plusieurs opérateurs réalisent des traçages simultanément dans un même périmètre,
  - > de garder trace des opérations de traçages y compris celles non bancarisées dans la base de données régionale des traçages
3. contrôler le type de traceur injecté dans les eaux souterraines

<b><u>Prestataire responsable des essais :</u></b>		BRGM / IDDEA	
<b><u>Personne responsable :</u></b>	<b>Nom :</b> PY DAVID N BRETOT	<b>Tél :</b> 02.35.60.12.00 02.35.66.36.67	<b>E-mail :</b> py.david@brgm.fr nicolas.bretot@iddea-ingenierie.fr
<b><u>Intitulé de l'étude :</u></b> BRGM / Opération de tracages hydrogéologiques dans le bassin de l'Avre			

Date : 9/7/2013

Signature



**A renvoyer au moins 15 jours avant le début de l'essai de traçage :**

- par mail aux destinataires suivant :

- Bureau de la police de l'eau de la DDTM : [ddtm-srmt-bpe@seine-maritime.gouv.fr](mailto:ddtm-srmt-bpe@seine-maritime.gouv.fr) (si dpt76)  
[ddtm-sebf-pep@eure.gouv.fr](mailto:ddtm-sebf-pep@eure.gouv.fr) (si dpt27)
- DREAL Service ressource : [veronique.feeny@developpement-durable.gouv.fr](mailto:veronique.feeny@developpement-durable.gouv.fr)
- ARS Haute-Normandie  
[Anne.GERARD@ars.sante.fr](mailto:Anne.GERARD@ars.sante.fr) (si dpt 76)  
[Delphine.JULIEN@ars.sante.fr](mailto:Delphine.JULIEN@ars.sante.fr) (si dpt 27)
- Collectivités AEP concernées \*1 : [selon secteur](#)
- BRGM : [SGR\\_HNO@brgm.fr](mailto:SGR_HNO@brgm.fr)
- Cellule opérationnelle de la Gendarmerie : [corg.ggd76@gendarmerie.interieur.gouv.fr](mailto:corg.ggd76@gendarmerie.interieur.gouv.fr) (si dpt76)  
[corg.ggd27@gendarmerie.interieur.gouv.fr](mailto:corg.ggd27@gendarmerie.interieur.gouv.fr) (si dpt27)

\*1 A charge aux collectivités AEP qui recevront cette déclaration de prévenir leur éventuel distributeur d'eau si la distribution ne se fait pas en régie

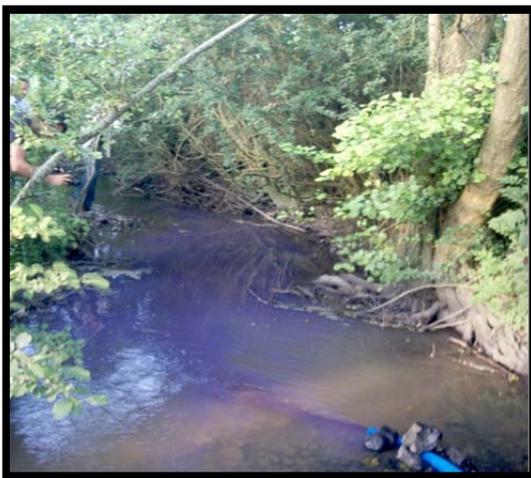
**ET**

- par courrier à : DREAL Haute-Normandie / Service Ressources – 1, rue Dufay – 76100 ROUEN

Situation des essais				Traceur		Date prévue pour l'injection
Injection		Suivi		Traceur utilisé	Quantité / Unité	
Commune (département)	Points d'injection : - ID Bétoire, si bétoire - N°BSS, si forage - X, Y L93. Si autre	Points de suivi : - N°BSS si forage ou source - X, Y L93. Si autre	Durée prévisionnelle du suivi			
LES CHATELETS (28)  LA SAUCELLE (28)	X = 553 750 Y = 6 841 204  X = 555 871 Y = 6 839 161	- Sce 216-5-034 - - F 216-5-020 - - Sces 215-3-2026 à 2033 - - P 216-1-001 - - -	40 j  40 j  40 j  40 j	Naphtionate de Sodium	2 x 60 kg	15/7/2013 19h
		- Pt Jeaugeage n°3 - X = 555 893 - Y = 6 843 605 - - Pt Jeaugeage n°4 - X = 557 477 - Y = 6 852 752 - - Pt Jeaugeage n°6 - X = 562 854 - Y = 6 852 752	40 j   40 j   40 j			



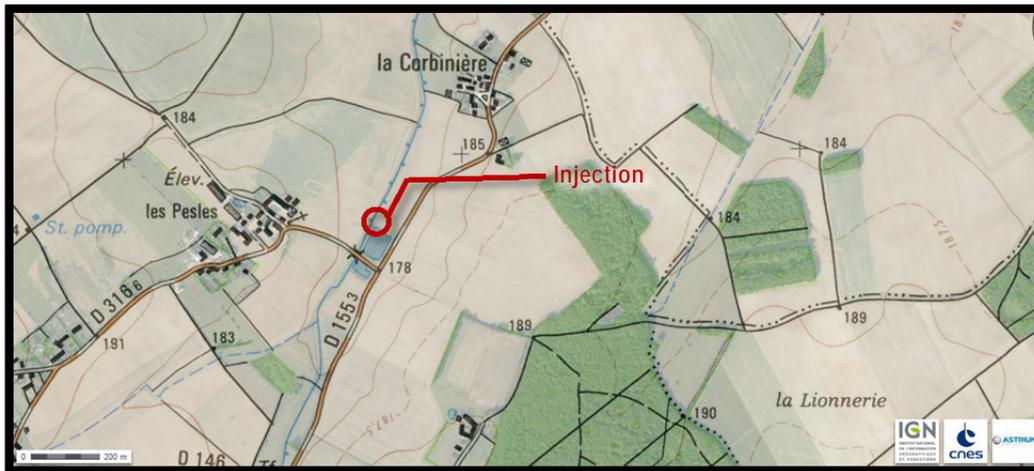
	<b>Date d'injection</b>	<b>15/07/2013</b>	<b>Traceur</b>	<b>Naphtionate de Sodium</b>
Lambert II étendu (Geoportail)	X (m)	502 551	Fournisseur	ARTE COLOR - 69380 -LOZANNE - France
	Y(m)	2 407 024	<b>Quantité</b>	<b>60 kg</b>
	Z (m NGF)	175	Solution mère	Dilution dans 1 000 l d'eau
Propriétaire	-		Concentration initiale	60 g/l
	Exploitant	-	Conditionnement traceur	1 citerne PVC noire d'1 m <sup>3</sup> traités anti UV
Volume rinçage préalable	-		Transport traceur	Télescopique Manitou
Début injection	20 :30		Transport d'eau	Prélèvement dans rivière
Fin injection	21 :15		Société mandataire	IDDEA
Volume de Chasse (y compris rinçage citernes PVC)	Environ 10 m <sup>3</sup>		Intervenants	Entreprise SAILLY



*Injection – IDDEA 15/07/2013*



*Dispositif d'injection – IDDEA 15/07/2013*



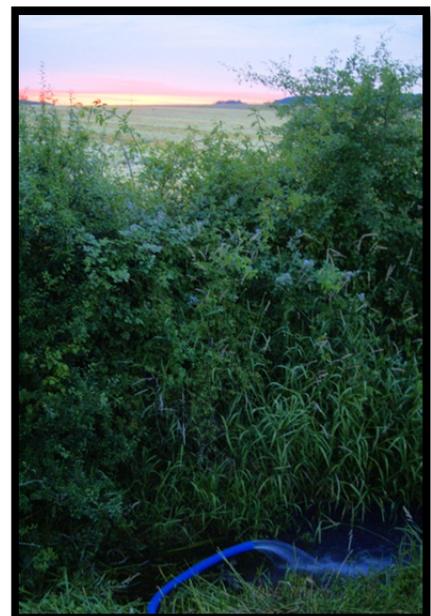
<b>Date d'injection</b>	<b>15/07/2013</b>	<b>Traceur</b>	<b>Naphtionate de Sodium</b>
Lambert II étendu (Geoportail)	X (m) 504 692	Fournisseur	ARTE COLOR - 69380 - LOZANNE - France
	Y(m) 2 404 984	<b>Quantité</b>	<b>60 kg</b>
	Z (m NGF) 180	Solution mère	Dilution dans 1 000 l
Propriétaire	-	Concentration initiale	60 g/l
Exploitant	-	Conditionnement traceur	1 citerne PVC noire d'1 m <sup>3</sup> traitée anti UV
Volume rinçage préalable	-	Transport traceur	Télescopique Manitou
Début injection	22 :02	Transport d'eau	Prélèvement dans Etang
Fin injection	22 :45	Société mandataire	IDDEA
Volume de rinçage	Environ 10 m <sup>3</sup>	Intervenants	Entreprise SAILLY



Matériel de transport – IDDEA 15/07/2013



Rinçage – IDDEA 15/07/2013



Injection – IDDEA 15/07/2013

ANNEXE 2 : JAUGEAGES



v 1.0.0 du 31/03/2010

# Mesure du débit dans un canal in Hydraulique générale - Armando LENCASTRE -2008

Client : BRGM

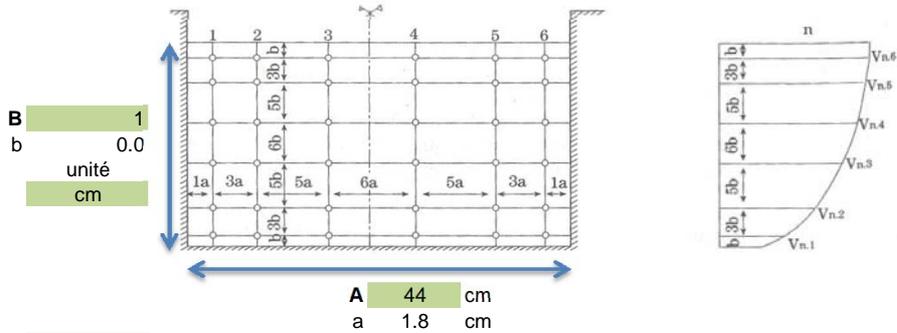
Etudes : IC130157

Intitulé : Meuvette 2

Date : 22/07/2013

Opérateur

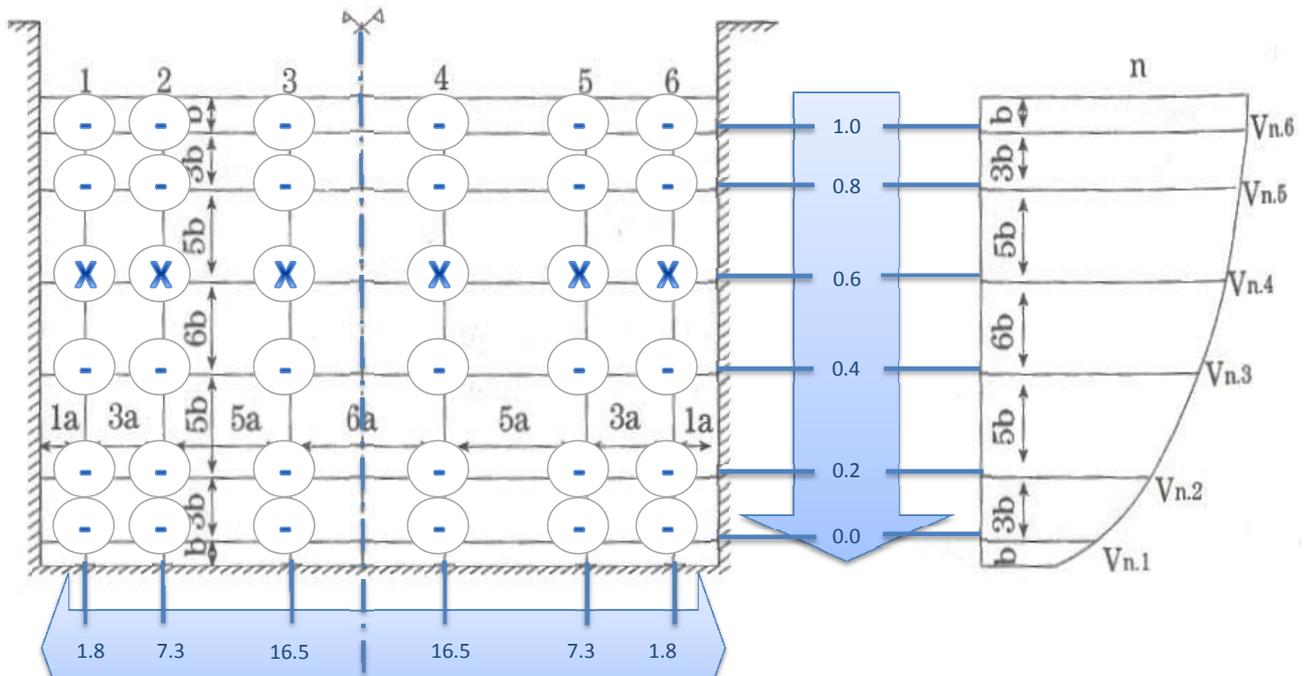
Nicolas BRETOT



Unité des vitesses m/s

V <sub>1,6</sub>	V <sub>2,6</sub>	V <sub>3,6</sub>	V <sub>4,6</sub>	V <sub>5,6</sub>	V <sub>6,6</sub>
V <sub>1,5</sub>	V <sub>2,5</sub>	V <sub>3,5</sub>	V <sub>4,5</sub>	V <sub>5,5</sub>	V <sub>6,5</sub>
V <sub>1,4</sub>	V <sub>2,4</sub>	V <sub>3,4</sub>	V <sub>4,4</sub>	V <sub>5,4</sub>	V <sub>6,4</sub>
0.06	0.008	0.188	0.145	0.106	0.162
V <sub>1,3</sub>	V <sub>2,3</sub>	V <sub>3,3</sub>	V <sub>4,3</sub>	V <sub>5,3</sub>	V <sub>6,3</sub>
V <sub>1,2</sub>	V <sub>2,2</sub>	V <sub>3,2</sub>	V <sub>4,2</sub>	V <sub>5,2</sub>	V <sub>6,2</sub>
V <sub>1,1</sub>	V <sub>2,1</sub>	V <sub>3,1</sub>	V <sub>4,1</sub>	V <sub>5,1</sub>	V <sub>6,1</sub>

**V1 (m/s)** 0.06    **V2 (m/s)** 0.01    **V3 (m/s)** 0.19    **V4 (m/s)** 0.15    **V5 (m/s)** 0.11    **V6 (m/s)** 0.16    **U (m/s) = 0.121**





v 1.0.0 du 31/03/2010

# Mesure du débit dans un canal in Hydraulique générale - Armando LENCASTRE -2008

Client : BRGM

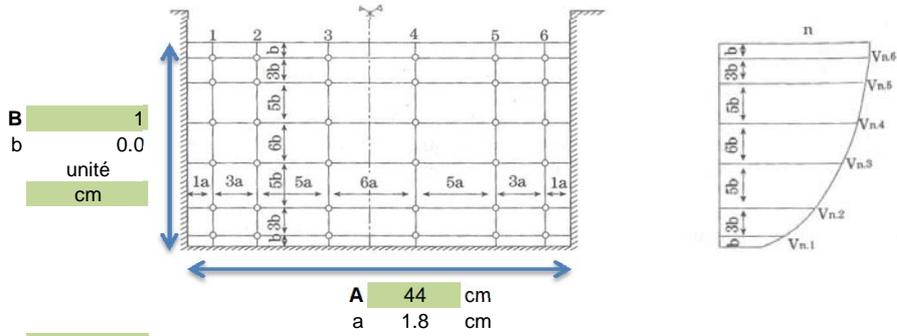
Etudes : IC130157

Intitulé : Meuvette 2

Date : 22/07/2013

Opérateur

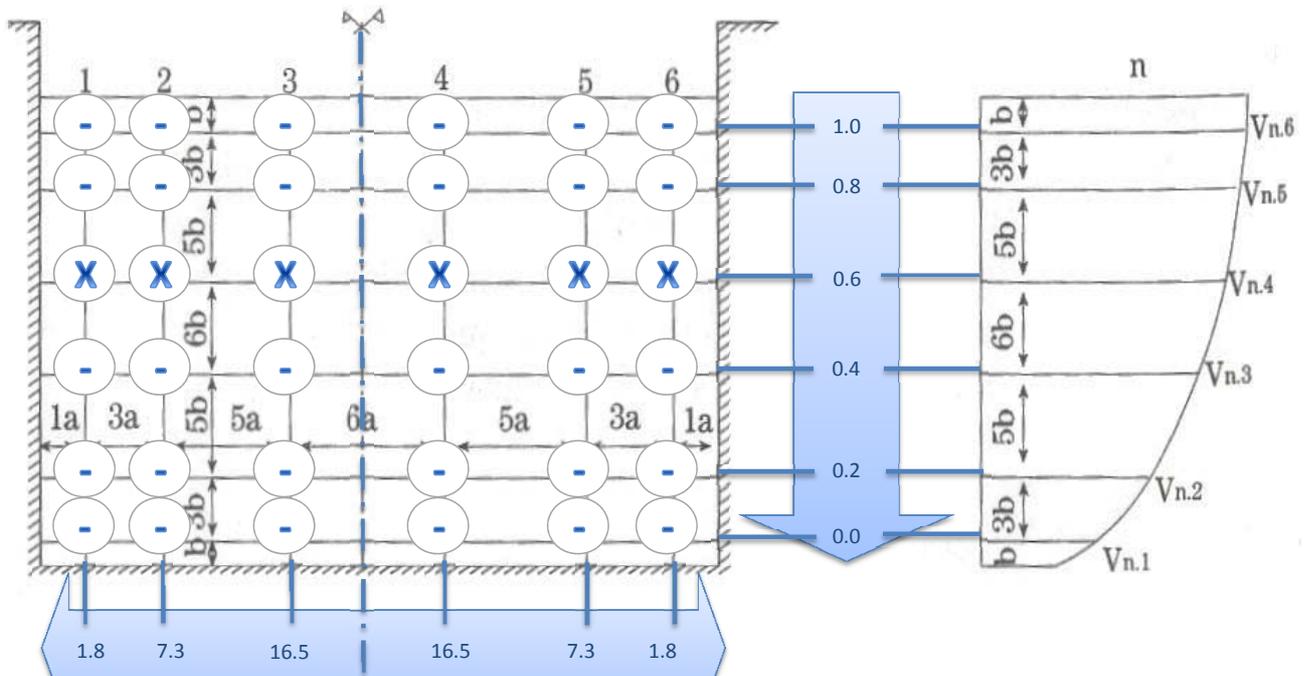
Nicolas BRETOT



Unité des vitesses m/s

V <sub>1,6</sub>	V <sub>2,6</sub>	V <sub>3,6</sub>	V <sub>4,6</sub>	V <sub>5,6</sub>	V <sub>6,6</sub>
V <sub>1,5</sub>	V <sub>2,5</sub>	V <sub>3,5</sub>	V <sub>4,5</sub>	V <sub>5,5</sub>	V <sub>6,5</sub>
V <sub>1,4</sub>	V <sub>2,4</sub>	V <sub>3,4</sub>	V <sub>4,4</sub>	V <sub>5,4</sub>	V <sub>6,4</sub>
0.06	0.008	0.188	0.145	0.106	0.162
V <sub>1,3</sub>	V <sub>2,3</sub>	V <sub>3,3</sub>	V <sub>4,3</sub>	V <sub>5,3</sub>	V <sub>6,3</sub>
V <sub>1,2</sub>	V <sub>2,2</sub>	V <sub>3,2</sub>	V <sub>4,2</sub>	V <sub>5,2</sub>	V <sub>6,2</sub>
V <sub>1,1</sub>	V <sub>2,1</sub>	V <sub>3,1</sub>	V <sub>4,1</sub>	V <sub>5,1</sub>	V <sub>6,1</sub>

**V1 (m/s)** 0.06    **V2 (m/s)** 0.01    **V3 (m/s)** 0.19    **V4 (m/s)** 0.15    **V5 (m/s)** 0.11    **V6 (m/s)** 0.16    **U (m/s) = 0.121**

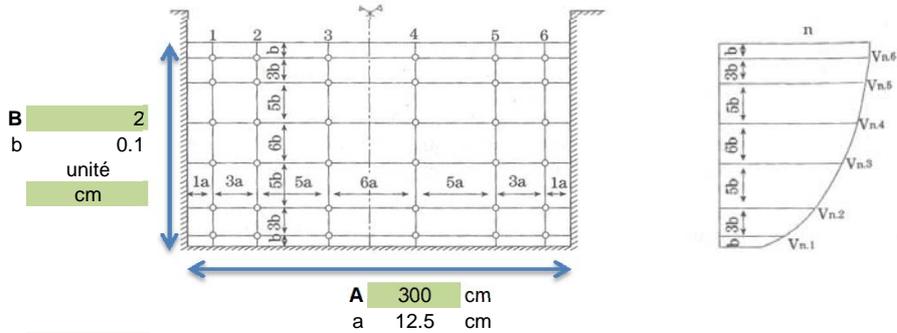




v 1.0.0 du 31/03/2010

# Mesure du débit dans un canal in Hydraulique générale - Armando LENCASTRE -2008

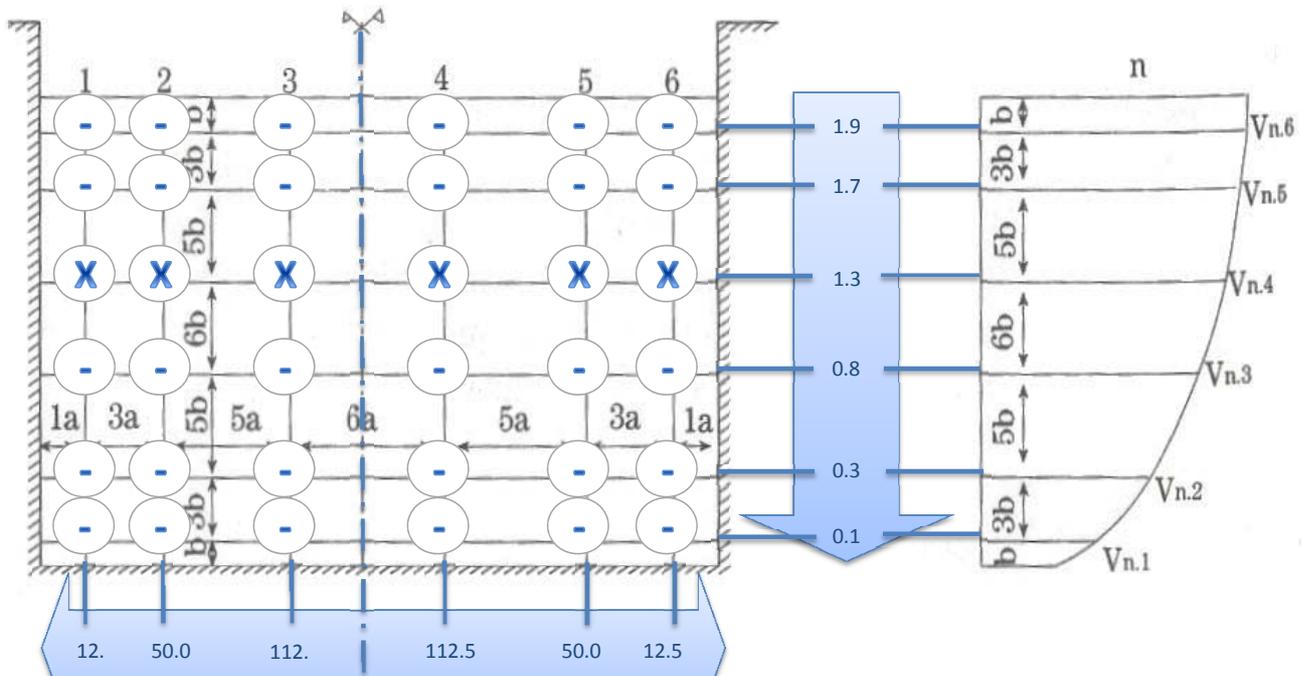
Client : BRGM  
 Etudes : IC130157  
 Intitulé : Meuvette  
 Date : 22/07/2013 Opérateur : Nicolas BRETOT



Unité des vitesses m/s

V <sub>1,6</sub>	V <sub>2,6</sub>	V <sub>3,6</sub>	V <sub>4,6</sub>	V <sub>5,6</sub>	V <sub>6,6</sub>
V <sub>1,5</sub>	V <sub>2,5</sub>	V <sub>3,5</sub>	V <sub>4,5</sub>	V <sub>5,5</sub>	V <sub>6,5</sub>
V <sub>1,4</sub>	V <sub>2,4</sub>	V <sub>3,4</sub>	V <sub>4,4</sub>	V <sub>5,4</sub>	V <sub>6,4</sub>
0.419	0.333	0.236	0.141	0.058	0.01
V <sub>1,3</sub>	V <sub>2,3</sub>	V <sub>3,3</sub>	V <sub>4,3</sub>	V <sub>5,3</sub>	V <sub>6,3</sub>
V <sub>1,2</sub>	V <sub>2,2</sub>	V <sub>3,2</sub>	V <sub>4,2</sub>	V <sub>5,2</sub>	V <sub>6,2</sub>
V <sub>1,1</sub>	V <sub>2,1</sub>	V <sub>3,1</sub>	V <sub>4,1</sub>	V <sub>5,1</sub>	V <sub>6,1</sub>

V1 (m/s) 0.42    V2 (m/s) 0.33    V3 (m/s) 0.24    V4 (m/s) 0.14    V5 (m/s) 0.06    V6 (m/s) 0.01    U (m/s) = 0.195





Mesure du débit dans un canal  
in Hydraulique générale - Armando LENCASTRE -2008

Client : BRGM

Etudes : IC130157

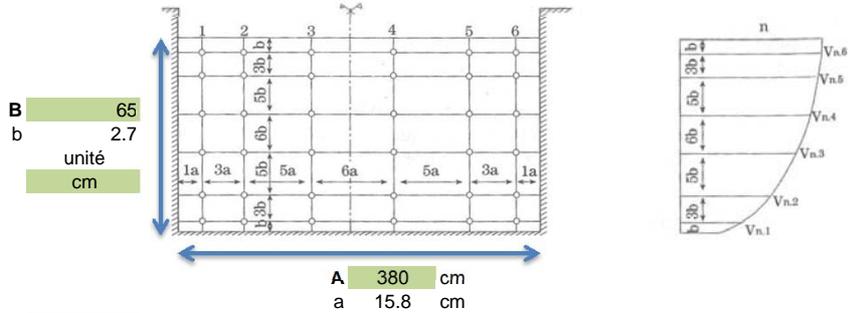
Intitulé : Rivière au Moulin

Date 22/07/2013

Opérateur

Nicolas BRETOT

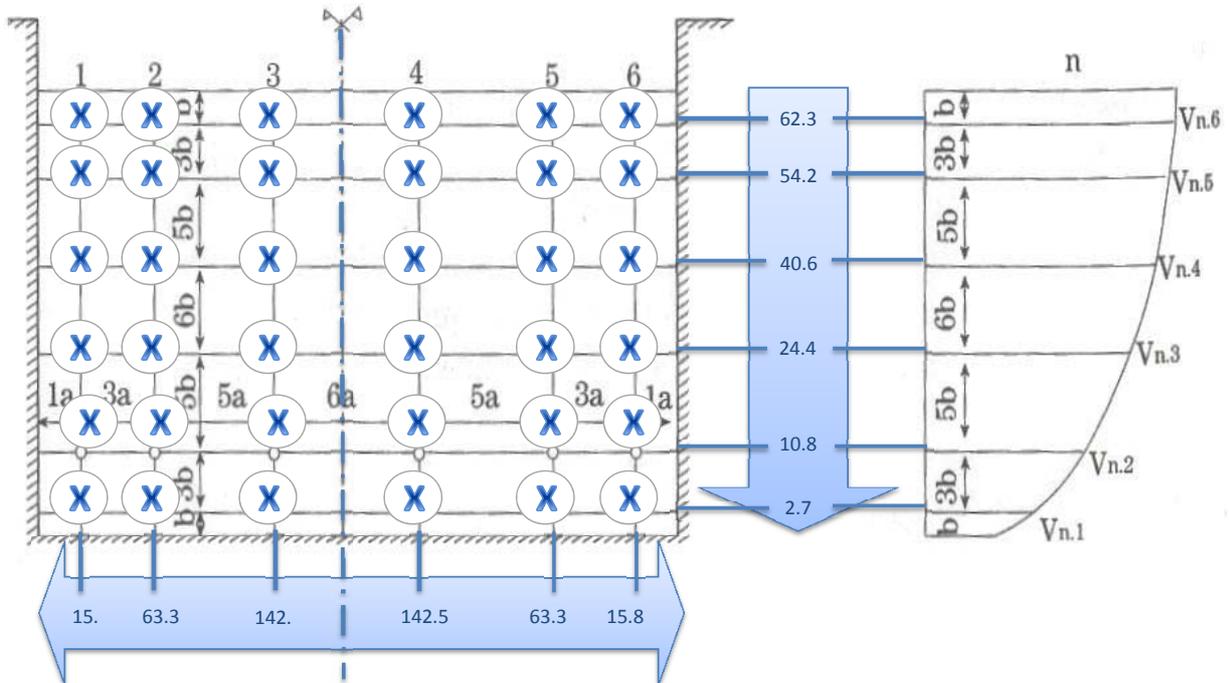
v 1.0.0 du 31/03/2010



Unité des vitesses m/s

$V_{1,6}$	$V_{2,6}$	$V_{3,6}$	$V_{4,6}$	$V_{5,6}$	$V_{6,6}$
0.008	0.002	0.003	0.127	0.191	0.24
$V_{1,5}$	$V_{2,5}$	$V_{3,5}$	$V_{4,5}$	$V_{5,5}$	$V_{6,5}$
0	0	0.013	0.12	0.167	0.187
$V_{1,4}$	$V_{2,4}$	$V_{3,4}$	$V_{4,4}$	$V_{5,4}$	$V_{6,4}$
0	0	0.012	0.155	0.18	0.162
$V_{1,3}$	$V_{2,3}$	$V_{3,3}$	$V_{4,3}$	$V_{5,3}$	$V_{6,3}$
0	0	0	0.09	0.19	0.164
$V_{1,2}$	$V_{2,2}$	$V_{3,2}$	$V_{4,2}$	$V_{5,2}$	$V_{6,2}$
0	0	0	0	0.033	0.164
$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{3,1}$	$V_{4,1}$	$V_{5,1}$	$V_{6,1}$
0	0	0	0	0	0.038

V1 (m/s) 0.00 V2 (m/s) 0.00 V3 (m/s) 0.01 V4 (m/s) 0.09 V5 (m/s) 0.14 V6 (m/s) 0.16 U (m/s) = 0.062

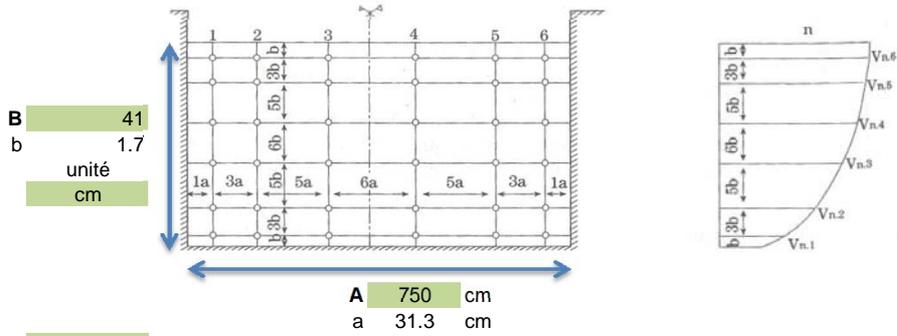




v 1.0.0 du 31/03/2010

# Mesure du débit dans un canal in Hydraulique générale - Armando LENCASTRE -2008

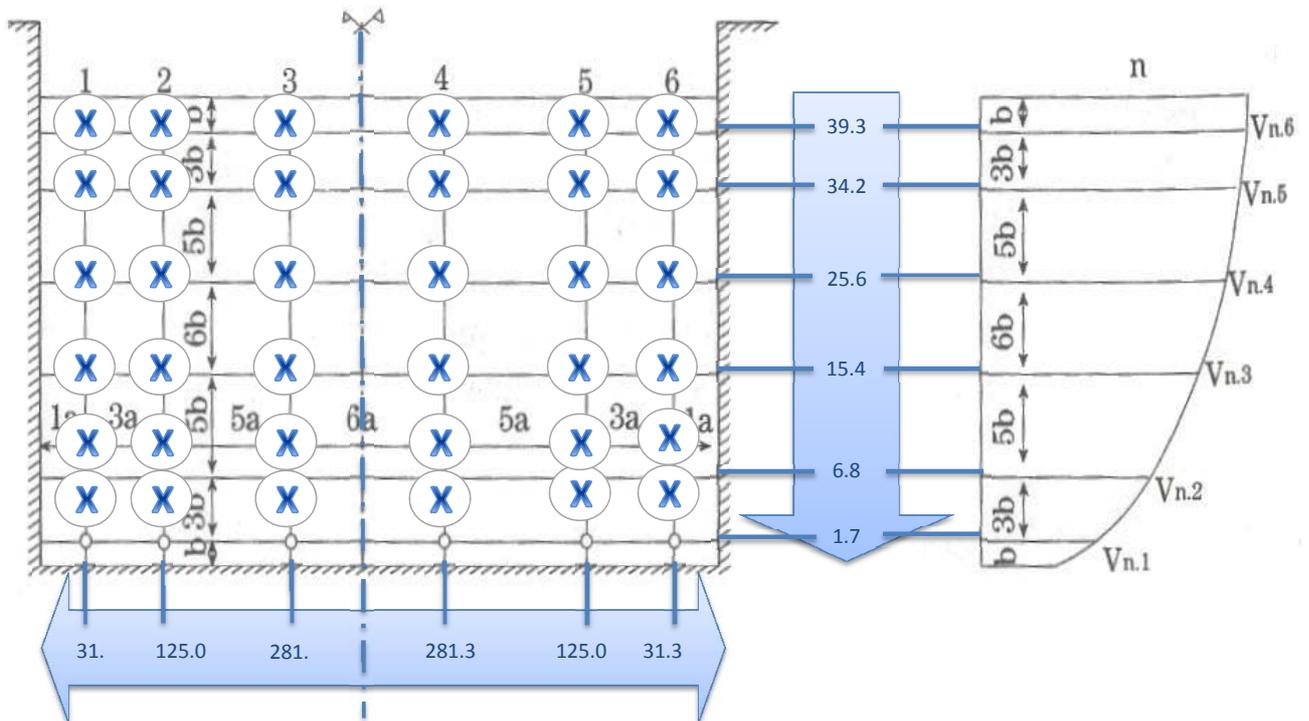
Client : BRGM  
 Etudes : IC130157  
 Intitulé : Aval Etang Dampierre sur Blévy  
 Date : 22/07/2013 Opérateur : Nicolas BRETOT



Unité des vitesses m/s

$V_{1,6}$	$V_{2,6}$	$V_{3,6}$	$V_{4,6}$	$V_{5,6}$	$V_{6,6}$
0.019	0.296	0.312	0.237	0.197	0.143
$V_{1,5}$	$V_{2,5}$	$V_{3,5}$	$V_{4,5}$	$V_{5,5}$	$V_{6,5}$
0.031	0.235	0.287	0.208	0.143	0.109
$V_{1,4}$	$V_{2,4}$	$V_{3,4}$	$V_{4,4}$	$V_{5,4}$	$V_{6,4}$
0.005	0.226	0.263	0.232	0.183	0.091
$V_{1,3}$	$V_{2,3}$	$V_{3,3}$	$V_{4,3}$	$V_{5,3}$	$V_{6,3}$
0.041	0.103	0.220	0.149	0.123	0.041
$V_{1,2}$	$V_{2,2}$	$V_{3,2}$	$V_{4,2}$	$V_{5,2}$	$V_{6,2}$
0	0	0.124	0.192	0.159	0.030
$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{3,1}$	$V_{4,1}$	$V_{5,1}$	$V_{6,1}$
0	0	0	0.178	0.058	0
<b>V1 (m/s)</b>	<b>V2 (m/s)</b>	<b>V3 (m/s)</b>	<b>V4 (m/s)</b>	<b>V5 (m/s)</b>	<b>V6 (m/s)</b>
0.02	0.15	0.22	0.20	0.15	0.07

**U (m/s) = 0.159**



ANNEXE 3 :  
ANALYSES CETRAHE

## CETRAHE

Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en TRAçages

Appliqués à Hydrogéologie et à l'Environnement

Université d'Orléans – Polytech

8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex 2, France

Contact : nevila.jozja@univ-orleans.fr

Tel : 33/0-238-49/24-40/48-37



## Recherche et dosage de traceurs fluorescents par spectrofluorimétrie : Expertise analytique

Date	02/12/2013
Laboratoire/BE demandeur:	IDDEA ingénierie

Contact	Nicolas Bretot
Opérateur analytique	Audrey Guirimand-Dufour
Nombre d'échantillons	
Fournisseur des traceurs	Fluotechnik

### Méthode et appareillage :

Technique du double balayage synchronisé

Spectrofluorimètre Hitachi F-7000 avec passeur automatique AS-3000

### Limites de détection (*mesurées sur échantillons non filtrés*) :

	<u>Eaux naturelles optiquement propres</u>	<u>Bruit de fond élevé</u>
Naphtionate	0,025 µg/L	0,01 µg/L

### 1. Réalisation de spectres d'excitation et d'émission :

**spectre d'émission est la courbe intensité d'émission à différentes longueurs d'onde et mesurée à une longueur d'onde fixe d'excitation caractéristique à la substance. Il est en général centré sur un pic. Il est caractéristique de la molécule.**

**Spectre d'excitation est la courbe intensité de la lumière émise par une substance éclairée (ou excitée) à diverses longueurs d'onde et mesurée à une longueur d'onde fixe correspondant à la longueur d'onde d'émission de la substance, dans une direction perpendiculaire à celle de la radiation d'excitation de la longueur d'onde de la radiation d'excitation.**

Naphtionate

Les longueurs d'ondes caractéristiques : Ex = 322 nm      Em = 420 nm

## **DESCRIPTIF ET MODE D'EMPLOI D'UNE FEUILLE DE CALCUL « FICHIER DE SURVEILLANCE »**

**Colonne Concentration brute :** Concentration calculée à partir de la relation  $\text{concentration} = f(\text{intensité lumineuse mesurée})$  établie lors de l'étalonnage du spectrofluorimètre à l'aide du traceur utilisé. Compte tenu de la diversité d'origine de l'intensité lumineuse, cette concentration n'est pas nécessairement imputable à celle du traceur recherché. L'unité dépend de l'état sous lequel le traceur utilisé a été délivré par le fournisseur :

- la concentration est dite pondérale lorsque le traceur a été fourni à l'état solide, sous forme de poudre (les solutions confectionnées pour l'étalonnage ont été obtenues par pesée de masses de poudre de traceur). L'unité le plus souvent utilisée est le ng/ml (ou  $\mu\text{g/l} = 10^{-9} \text{ kg/l}$ ) ;
- la concentration est dite volumique lorsque le traceur a été fourni à l'état liquide, sous forme de solution concentrée de concentration exacte inconnue (les solutions confectionnées pour l'étalonnage ont été obtenues par mesure de volume de solution de traceur). L'unité le plus souvent utilisée est le pl/ml (ou  $\text{nl/l} = 10^{-9} \text{ l/l}$ ) ;

**Colonne Concentration corrigée :** Lors d'allumage successifs de la lampe du spectrofluorimètre, ce dernier ne délivre pas exactement les mêmes intensités pour une même série d'étalons ou d'échantillons. Il est alors nécessaire d'homogénéiser les valeurs des différentes séries en analysant à nouveau lors du passage d'une série n quelques échantillons de la série n-1 déjà analysée. On détermine alors une correction sous forme de quantité à ajouter ou à soustraire aux concentrations brutes non corrigées pour obtenir les concentrations corrigées ;

**Colonnes spectres :** Diagnostic d'analyse des spectres d'excitation et d'émission du traceur recherché. Ces spectres permettent de repérer les échantillons contenant effectivement le traceur recherché. On peut ainsi repérer le début de la restitution (on recherche le dernier échantillon ne contenant pas le traceur et le premier le contenant) et la fin de cette dernière (on recherche le dernier échantillon contenant le traceur et le premier ne le contenant plus) ;

**Colonne Concentration nette de traceur :** En fonction du diagnostic établi sur la présence ou l'absence du traceur révélée par les spectres, une nouvelle correction est appliquée aux concentrations brutes corrigées pour obtenir la concentration nette du traceur. Elle consiste à ajouter ou à soustraire (le plus souvent) la valeur de concentration brute corrigée observée sur l'échantillons précédant le début de la restitution (dernier

échantillon ne contenant pas de traceur) aux concentrations brutes corrigées pour obtenir les concentrations nettes. Il arrive que la concentration brute corrigée des échantillons précédant et suivant la restitution ne soit pas identique, ce qui indique une variation, pendant la restitution, de l'une des deux composantes (ou des deux à la fois) de l'intensité non imputables à la présence du traceur. Il est alors nécessaire d'admettre une hypothèse sur la forme de la décroissance ou de la croissance de la composante censée être à l'origine de cette dérive (le plus souvent la diffusion par les matières en suspension) pour effectuer la meilleure correction possible. La filtration ou l'ultracentrifugation des échantillons n'apporte pas une solution à ce problème puisque la fluorescence du traceur éventuellement adsorbé sur les particules en suspension se trouve ainsi soustraite à la mesure.

Report Date: 09:46:38, 01/13/2014

File Name: Naphtionate 040913

Run Date: 26:07.1

Operator: CETRAHE

Instrument

Model: F-7000 FL Spectrophotometer

Serial Number: 2137-007

ROM Version: 5J14000 06

Instrument Parameters

Measurement: Photometry

Data mode: Fluorescence

Number of Wavelengths: 1

Wavelength: Both WL Fixed

WL 1: 322.0/420.0 nm

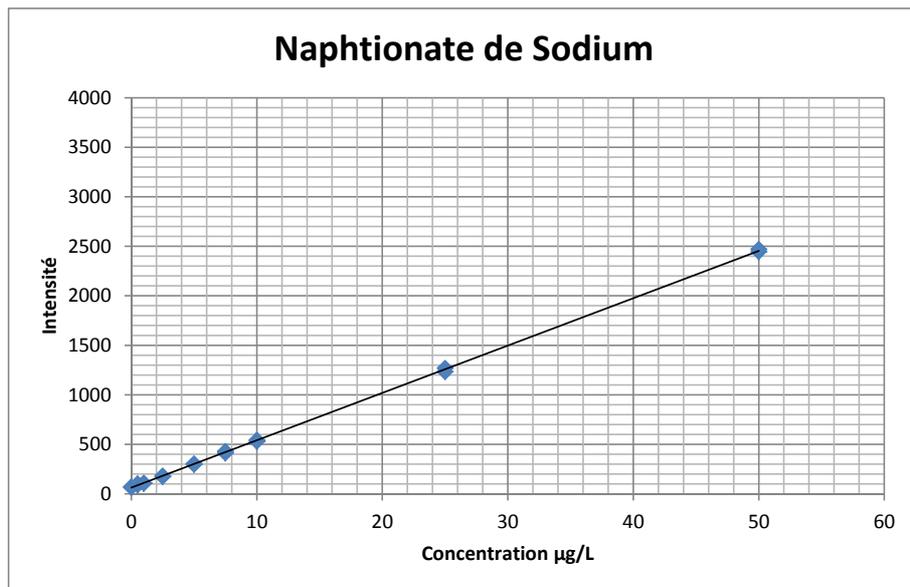
Integration time: 0.1 s

Delay: 1.0 s

EX Slit: 2.5 nm

EM Slit: 2.5 nm

PMT Voltage: 950 V



Std.No.	Repl.No.	322,0/420,0	Conc (ng/mL)	diff	RD	t
	1	1	70.16	0		
Comment:						
	2	68.01	0.128	0.02121	1.113	
Comment:						
2	1	89.03	0.5			
Comment:						
	2	103.6	0.5	0.197	0.03271	1.717
Comment:						
3	1	110.3	1			
Comment:						
	2	107.1	1	-0.044	-0.007309	-0.3835
Comment:						
4	1	174.5	2.5			
Comment:						
	2	182.7	2.5	-0.083	-0.01372	-0.7202
Comment:						
5	1	305	5			
Comment:						
	2	296.2	5	-0.032	-0.005329	-0.2797
Comment:						
6	1	413.5	7.5			
Comment:						
	2	429.2	7.5	-0.008	-0.001272	-0.06675
Comment:						
7	1	542.5	10			
Comment:						
	2	529.7	10	-0.109	-0.01804	-0.9466
Comment:						
8	1	1270	25			
Comment:						
	2	1234	25	-0.142	-0.02354	-1.235
Comment:						
9	1	2447	50			
Comment:						
	2	2471	50	0.092	0.01529	0.8026
Comment:						

Calibration type: 1st order

Force curve type: No

A0: -1.3165

A1: 0.020906

R: 0.99991

R2: 0.99982

Samp.No.	Repl.No.	322.0/420.0	Conc (ng/mL)	Avg Conc	[SD]	[CV](%)
----------	----------	-------------	--------------	----------	------	---------

**IDDEA**

**Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur

Naphtionate de Sodium

Masse injectée

2 x 60 kg

Lieu de prélèvement

**AEP LAUNAY**



CETRAHE

41 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL	
Relève 1	1	15/07/2013 15:00	0.000			0.000	
	2	15/07/2013 16:00				0.000	
	3	15/07/2013 17:00				0.000	
	4	15/07/2013 18:00				0.000	
	5	15/07/2013 19:00				0.000	
	6	15/07/2013 20:00				0.000	
	7	15/07/2013 21:00				0.000	
	8	15/07/2013 22:00				0.000	
	9	15/07/2013 23:00				0.000	
	10	16/07/2013 00:00			négatif	négatif	0.000
	11	16/07/2013 01:00					0.000
	12	16/07/2013 02:00					0.000
	13	16/07/2013 03:00					0.000
	14	16/07/2013 04:00					0.000
	15	16/07/2013 05:00					0.000
	16	16/07/2013 06:00					0.000
	17	16/07/2013 07:00					0.000
	18	16/07/2013 08:00					0.000
	19	16/07/2013 09:00					0.000
	20	16/07/2013 10:00					0.000
	21	16/07/2013 11:00					0.000
	22	16/07/2013 12:00		0.749			0.000
	23	16/07/2013 13:00					0.000
	24	16/07/2013 14:00					0.000
Relève 2	1	16/07/2013 15:00					
	2	16/07/2013 16:00					
	3	16/07/2013 17:00					
	4	16/07/2013 18:00					
	5	16/07/2013 19:00					
	6	16/07/2013 20:00					
	7	16/07/2013 21:00					
	8	16/07/2013 22:00					
	9	16/07/2013 23:00					
	10	17/07/2013 00:00					
	11	17/07/2013 01:00					
	12	17/07/2013 02:00					
	13	17/07/2013 03:00					
	14	17/07/2013 04:00					
	15	17/07/2013 05:00					
	16	17/07/2013 06:00					
	17	17/07/2013 07:00					
	18	17/07/2013 08:00					
	19	17/07/2013 09:00					
	20	17/07/2013 10:00					
	21	17/07/2013 11:00					
	22	17/07/2013 12:00					
	23	17/07/2013 13:00					
	24	17/07/2013 14:00					
Relève 3	1	17/07/2013 15:00					
	2	17/07/2013 16:00					
	3	17/07/2013 17:00					
	4	17/07/2013 18:00					
	5	17/07/2013 19:00					
	6	17/07/2013 20:00					
	7	17/07/2013 21:00					
	8	17/07/2013 22:00					
	9	17/07/2013 23:00					
	10	18/07/2013 00:00					
	11	18/07/2013 01:00					
	12	18/07/2013 02:00					
	13	18/07/2013 03:00					
	14	18/07/2013 04:00					
	15	18/07/2013 05:00					
	16	18/07/2013 06:00					
	17	18/07/2013 07:00					
	18	18/07/2013 08:00					
	19	18/07/2013 09:00					
	20	18/07/2013 10:00					
	21	18/07/2013 11:00					
	22	18/07/2013 12:00		0.702			0.000
	23	18/07/2013 13:00					0.000
	24	18/07/2013 14:00					0.000

**IDDEA**

**Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur Naphthonate de Sodium  
 Masse injectée 2 x 60 kg  
 Lieu de prélèvement AEP LAUNAY



CETRAHE

41 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 4	1	18/07/2013 15:00				0.000
	2	18/07/2013 19:00				0.000
	3	18/07/2013 23:00				0.000
	4	19/07/2013 03:00				0.000
	5	19/07/2013 07:00				0.000
	6	19/07/2013 11:00	0.9			0.000
	7	19/07/2013 15:00				0.000
	8	19/07/2013 19:00				0.000
	9	19/07/2013 23:00				0.000
	10	20/07/2013 03:00				0.000
	11	20/07/2013 07:00				0.000
	12	20/07/2013 11:00	0.818			0.000
	13	20/07/2013 15:00				0.000
	14	20/07/2013 19:00				0.000
	15	20/07/2013 23:00				0.000
	16	21/07/2013 03:00				0.000
	17	21/07/2013 07:00				0.000
	18	21/07/2013 11:00	0.667			0.000
	19	21/07/2013 15:00				0.000
	20	21/07/2013 19:00				0.000
	21	21/07/2013 23:00				0.000
	22	22/07/2013 03:00				0.000
	23	22/07/2013 07:00				0.000
	24	22/07/2013 11:00	0.752			0.000
Relève 5	1	22/07/2013 15:00				0.000
	2	22/07/2013 23:00				0.000
	3	23/07/2013 07:00				0.000
	4	23/07/2013 15:00	0.619			0.000
	5	23/07/2013 23:00				0.000
	6	24/07/2013 07:00				0.000
	7	24/07/2013 15:00	0.659			0.000
	8	24/07/2013 23:00				0.000
	9	25/07/2013 07:00				0.000
	10	25/07/2013 15:00	0.81			0.000
	11	25/07/2013 23:00				0.000
	12	26/07/2013 07:00				0.000
	13	26/07/2013 15:00	0.816			0.000
	14	26/07/2013 23:00				0.000
	15	27/07/2013 07:00				0.000
	16	27/07/2013 15:00	0.626			0.000
	17	27/07/2013 23:00				0.000
	18	28/07/2013 07:00				0.000
	19	28/07/2013 15:00	0.785			0.000
	20	28/07/2013 23:00				0.000
	21	29/07/2013 07:00				0.000
	22	29/07/2013 15:00	1.023			0.000
	23	29/07/2013 23:00				0.000
	24	30/07/2013 07:00				0.000
Relève 6	1	30/07/2013 15:00	1.071			0.000
	2	31/07/2013 04:00				0.000
	3	31/07/2013 17:00	1.32			0.000
	4	01/08/2013 06:00				0.000
	5	01/08/2013 19:00	1.288	négatif	négatif	0.000
	6	02/08/2013 08:00				0.000
	7	02/08/2013 21:00	1.272			0.000
	8	03/08/2013 10:00				0.000
	9	03/08/2013 23:00	1.01			0.000
	10	04/08/2013 12:00				0.000
	11	05/08/2013 01:00	1.033			0.000
	12	05/08/2013 14:00				0.000
	13	06/08/2013 03:00	0.831			0.000
	14	06/08/2013 16:00				0.000
	15	07/08/2013 05:00	0.874			0.000
	16	07/08/2013 18:00				0.000
	17	08/08/2013 07:00	0.756			0.000
	18	08/08/2013 20:00				0.000
	19	09/08/2013 09:00	0.793			0.000
	20	09/08/2013 22:00				0.000
	21	10/08/2013 11:00	0.989	négatif	négatif	0.000
	22	11/08/2013 00:00				0.000
	23	11/08/2013 13:00	0.977			0.000
	24	12/08/2013 02:00				0.000

**IDDEA****Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur Naphtonate de Sodium  
Masse injectée 2 x 60 kg  
Lieu de prélèvement **AEP LAUNAY**



CETRAHE

41 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 7	1	12/08/2013 14:30	0.678			0.000
	2	13/08/2013 04:30				0.000
	3	13/08/2013 18:30	0.933			0.000
	4	14/08/2013 08:30				0.000
	5	14/08/2013 22:30	0.885			0.000
	6	15/08/2013 12:30	0.607			0.000
	7	16/08/2013 02:30				0.000
	8	16/08/2013 16:30	0.597			0.000
	9	17/08/2013 06:30				0.000
	10	17/08/2013 20:30	0.608			0.000
	11	18/08/2013 10:30	0.576			0.000
	12	19/08/2013 00:30				0.000
	13	19/08/2013 14:30	0.946	négatif	négatif	0.000
	14	20/08/2013 04:30				0.000
	15	20/08/2013 18:30	0.463			0.000
	16	21/08/2013 08:30				0.000
	17	21/08/2013 22:30	0.497			0.000
	18	22/08/2013 12:30	0.696			0.000
	19	23/08/2013 02:30				0.000
	20	23/08/2013 16:30	0.312			0.000
	21	24/08/2013 06:30				0.000
	22	24/08/2013 20:30	0.691			0.000
	23	25/08/2013 10:30	0.654			0.000
	24	26/08/2013 00:30	0.397			0.000

**IDDEA**

Tracage Vallée de l'Avre

Traceur

Naphtionate de Sodium

Masse injectée

2 x 60 kg

Lieu de prélèvement

Meuvette Dampierre sur Avre



CETRAHE

33

analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 1	1	15/07/2013 16:30	0.213			0.000
	2	15/07/2013 17:30				0.000
	3	15/07/2013 18:30				0.000
	4	15/07/2013 19:30				0.000
	5	15/07/2013 20:30				0.000
	6	15/07/2013 21:30				0.000
	7	15/07/2013 22:30				0.000
	8	15/07/2013 23:30				0.000
	9	16/07/2013 00:30				0.000
	10	16/07/2013 01:30				0.000
	11	16/07/2013 02:30				0.000
	12	16/07/2013 03:30				0.000
	13	16/07/2013 04:30				0.000
	14	16/07/2013 05:30	0.214			0.000
	15	16/07/2013 06:30				0.000
	16	16/07/2013 07:30				0.000
	17	16/07/2013 08:30				0.000
	18	16/07/2013 09:30				0.000
	19	16/07/2013 10:30				0.000
	20	16/07/2013 11:30	0.214	négatif	négatif	0.000
	21	16/07/2013 12:30				0.000
	22	16/07/2013 13:30				0.000
	23	16/07/2013 14:30				0.000
	24	16/07/2013 15:30	0.231			0.000
Relève 2	1	16/07/2013 17:30				0.000
	2	16/07/2013 18:30	0.281			0.000
	3	16/07/2013 19:30				0.000
	4	16/07/2013 20:30	0.285			0.000
	5	16/07/2013 21:30				0.000
	6	16/07/2013 22:30	0.247			0.000
	7	16/07/2013 23:30				0.000
	8	17/07/2013 00:30	0.200			0.000
	9	17/07/2013 01:30				0.000
	10	17/07/2013 02:30				0.000
	11	17/07/2013 03:30				0.000
	12	17/07/2013 04:30				0.000
	13	17/07/2013 05:30				0.000
	14	17/07/2013 06:30	0.264			0.000
	15	17/07/2013 07:30				0.000
	16	17/07/2013 08:30				0.000
	17	17/07/2013 09:30				0.000
	18	17/07/2013 10:30				0.000
	19	17/07/2013 11:30				0.000
	20	17/07/2013 12:30	0.624	négatif	négatif	0.000
	21					0.000
	22					0.000
	23					0.000
	24					0.000
Relève 3	1	17/07/2013 13:30	0.358			0.000
	2	17/07/2013 14:30				0.000
	3	17/07/2013 15:30				0.000
	4	17/07/2013 16:30	0.291			0.000
	5	17/07/2013 17:30				0.000
	6	17/07/2013 18:30	0.122			0.000
	7	17/07/2013 19:30				0.000
	8	17/07/2013 20:30	0.133			0.000
	9	17/07/2013 21:30				0.000
	10	17/07/2013 22:30	0.372			0.000
	11	17/07/2013 23:30				0.000
	12	18/07/2013 00:30	0.236			0.000
	13	18/07/2013 01:30				0.000
	14	18/07/2013 02:30	0.267			0.000
	15	18/07/2013 03:30				0.000
	16	18/07/2013 04:30	0.308			0.000
	17	18/07/2013 05:30				0.000
	18	18/07/2013 06:30	0.205			0.000
	19	18/07/2013 07:30				0.000
	20	18/07/2013 08:30	0.261			0.000
	21	18/07/2013 09:30				0.000
	22	18/07/2013 10:30				0.000
	23	18/07/2013 11:30				0.000
	24	18/07/2013 12:30				0.000

**IDDEA**

Tracage Vallée de l'Avre

Traceur

Naphtionate de Sodium

Masse injectée

2 x 60 kg

Lieu de prélèvement

Meuvette Dampierre sur Avre



CETRAHE

33

analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 4	1	18/07/2013 13:30	0.214			0.000
	2	18/07/2013 17:30				0.000
	3	18/07/2013 21:30				0.000
	4	19/07/2013 01:30				0.000
	5	19/07/2013 05:30				0.000
	6	19/07/2013 09:30				0.000
	7	19/07/2013 13:30	0.138			0.000
	8	19/07/2013 17:30				0.000
	9	19/07/2013 21:30				0.000
	10	20/07/2013 01:30				0.000
	11	20/07/2013 05:30				0.000
	12	20/07/2013 09:30				0.000
	13	20/07/2013 13:30	0.214			0.000
	14	20/07/2013 17:30				0.000
	15	20/07/2013 21:30				0.000
	16	21/07/2013 01:30				0.000
	17	21/07/2013 05:30				0.000
	18	21/07/2013 09:30				0.000
	19	21/07/2013 13:30	0.218			0.000
	20	21/07/2013 17:30				0.000
	21	21/07/2013 21:30				0.000
	22	22/07/2013 01:30				0.000
	23	22/07/2013 05:30				0.000
	24	22/07/2013 09:30				0.000
Relève 5	1	22/07/2013 13:30	0.234			0.000
	2	22/07/2013 21:30				0.000
	3	23/07/2013 05:30				0.000
	4	23/07/2013 13:30				0.000
	5	23/07/2013 21:30				0.000
	6	24/07/2013 05:30				0.000
	7	24/07/2013 13:30	0.264			0.000
	8	24/07/2013 21:30				0.000
	9	25/07/2013 05:30				0.000
	10	25/07/2013 13:30				0.000
	11	25/07/2013 21:30				0.000
	12	26/07/2013 05:30				0.000
	13	26/07/2013 13:30	0.221			0.000
	14	26/07/2013 21:30				0.000
	15	27/07/2013 05:30				0.000
	16	27/07/2013 13:30				0.000
	17	27/07/2013 21:30				0.000
	18	28/07/2013 05:30				0.000
	19	28/07/2013 13:30	0.208			0.000
	20	28/07/2013 21:30				0.000
	21	29/07/2013 05:30				0.000
	22	29/07/2013 13:30				0.000
	23	29/07/2013 21:30				0.000
	24	30/07/2013 05:30				0.000
Relève 6	1	30/07/2013 13:30	0.273			0.000
	2	31/07/2013 02:30				0.000
	3	31/07/2013 15:30				0.000
	4	01/08/2013 04:30				0.000
	5	01/08/2013 17:30				0.000
	6	02/08/2013 06:30				0.000
	7	02/08/2013 19:30				0.000
	8	03/08/2013 08:30				0.000
	9	03/08/2013 21:30				0.000
	10	04/08/2013 10:30				0.000
	11	04/08/2013 23:30				0.000
	12	05/08/2013 12:30	0.393			0.000
	13	06/08/2013 01:30				0.000
	14	06/08/2013 14:30				0.000
	15	07/08/2013 03:30				0.000
	16	07/08/2013 16:30				0.000
	17	08/08/2013 05:30				0.000
	18	08/08/2013 18:30				0.000
	19	09/08/2013 07:30				0.000
	20	09/08/2013 20:30				0.000
	21	10/08/2013 09:30				0.000
	22	10/08/2013 22:30				0.000
	23	11/08/2013 11:30				0.000
	24	12/08/2013 00:30				0.000

**IDDEA****Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur Naphtionate de Sodium  
Masse injectée 2 x 60 kg  
Lieu de prélèvement **Meuvette Dampierre sur Avre**



CETRAHE

33

analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 7	1	12/08/2013 12:15	0.261			0.000
	2	13/08/2013 02:15				0.000
	3	13/08/2013 16:15				0.000
	4	14/08/2013 06:15				0.000
	5	14/08/2013 20:15				0.000
	6	15/08/2013 10:15				0.000
	7	16/08/2013 00:15				0.000
	8	16/08/2013 14:15				0.000
	9	17/08/2013 04:15				0.000
	10	17/08/2013 18:15				0.000
	11	18/08/2013 08:15				0.000
	12	18/08/2013 22:15	0.184			0.000
	13	19/08/2013 12:15				0.000
	14	20/08/2013 02:15				0.000
	15	20/08/2013 16:15				0.000
	16	21/08/2013 06:15				0.000
	17	21/08/2013 20:15				0.000
	18	22/08/2013 10:15				0.000
	19	23/08/2013 00:15				0.000
	20	23/08/2013 14:15				0.000
	21	24/08/2013 04:15				0.000
	22	24/08/2013 18:15				0.000
	23	25/08/2013 08:15				0.000
	24	25/08/2013 22:15	1.079	négatif	négatif	0.000

**IDDEA**

Traçage Vallée de l'Avre

Traceur

Masse injectée

Lieu de prélèvement

Naphtionate de Sodium

2 x 60 kg

Meuvette Moulin Neuf



CETRAHE

75 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C* nette en ng/mL
Relève 1	1	15/07/2013 13:30	3.251			0.000
	2	15/07/2013 14:30				0.000
	3	15/07/2013 15:30				0.000
	4	15/07/2013 16:30				0.000
	5	15/07/2013 17:30				0.000
	6	15/07/2013 18:30				0.000
	7	15/07/2013 19:30				0.000
	8	15/07/2013 20:30				0.000
	9	15/07/2013 21:30				0.000
	10	15/07/2013 22:30	4.135			0.000
	11	15/07/2013 23:30				0.000
	12	16/07/2013 00:30	3.247			0.000
	13	16/07/2013 01:30	4.126	négatif	négatif	0.000
	14	16/07/2013 02:30	3.215			0.000
	15	16/07/2013 03:30	1.264			0.000
	16	16/07/2013 04:30	3.100			0.000
	17	16/07/2013 05:30	2.357			0.000
	18	16/07/2013 06:30	6.254	négatif	négatif	0.000
	19	16/07/2013 07:30	3.278			0.000
	20	16/07/2013 08:30				0.000
	21	16/07/2013 09:30				0.000
	22	16/07/2013 10:30				0.000
	23	16/07/2013 11:30				0.000
	24	16/07/2013 12:30				0.000
Relève 2	1	16/07/2013 18:30				0.000
	2	16/07/2013 19:30	4.905			0.000
	3	16/07/2013 20:30				0.000
	4	16/07/2013 21:30				0.000
	5	16/07/2013 22:30				0.000
	6	16/07/2013 23:30				0.000
	7	17/07/2013 00:30				0.000
	8	17/07/2013 01:30	16.025	négatif	négatif	0.000
	9	17/07/2013 02:30				0.000
	10	17/07/2013 03:30				0.000
	11	17/07/2013 04:30				0.000
	12	17/07/2013 05:30				0.000
	13	17/07/2013 06:30				0.000
	14	17/07/2013 07:30	1.671			0.000
	15	17/07/2013 08:30				0.000
	16	17/07/2013 09:30				0.000
	17	17/07/2013 10:30				0.000
	18	17/07/2013 11:30				0.000
	19	17/07/2013 12:30				0.000
	20	17/07/2013 13:30	7.249	négatif	négatif	0.000
	21	17/07/2013 14:30	2.842			
	22	17/07/2013 15:30	13.303	positif faible	positif faible	11.112
	23					
	24					
Relève 3	1	17/07/2013 16:30	28.182			25.991
	2	17/07/2013 17:30	54.168			51.977
	3	17/07/2013 18:30	90.503			88.312
	4	17/07/2013 19:30	124.120			121.929
	5	17/07/2013 20:30	142.391			140.200
	6	17/07/2013 21:30	137.395			135.204
	7	17/07/2013 22:30	144.064			141.873
	8	17/07/2013 23:30	144.377			142.186
	9	18/07/2013 00:30	155.144			152.953
	10	18/07/2013 01:30	133.130			130.939
	11	18/07/2013 02:30	115.799			113.608
	12	18/07/2013 03:30	103.172			100.981
	13	18/07/2013 04:30	107.395			105.204
	14	18/07/2013 05:30	90.294			88.103
	15	18/07/2013 06:30	88.600			86.409
	16	18/07/2013 07:30	64.036			61.845
	17	18/07/2013 08:30	72.314			70.123
	18	18/07/2013 09:30	68.468			66.277
	19	18/07/2013 10:30	53.165			50.974
	20	18/07/2013 11:30	58.642			56.451
	21	18/07/2013 12:30	51.220			49.029
	22	18/07/2013 13:30	44.969			42.778
	23	18/07/2013 14:30	42.293			40.102
	24	18/07/2013 15:30	36.398	positif	positif	34.207

**IDDEA**

Traçage Vallée de l'Avre

Traceur

Masse injectée

Lieu de prélèvement

Naphtionate de Sodium

2 x 60 kg

Meuvette Moulin Neuf



CETRAHE

75 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 4	1	18/07/2013 16:30	31.255			29.064
	2	18/07/2013 20:30	32.154			29.963
	3	19/07/2013 00:30	40.391			38.200
	4	19/07/2013 04:30	34.893			32.702
	5	19/07/2013 08:30	34.391			32.200
	6	19/07/2013 12:30	22.203			20.012
	7	19/07/2013 16:30	14.095			11.904
	8	19/07/2013 20:30	14.344			12.153
	9	20/07/2013 00:30	15.151			12.960
	10	20/07/2013 04:30	14.074			11.883
	11	20/07/2013 08:30				
	12	20/07/2013 12:30	10.569			8.378
	13	20/07/2013 16:30				
	14	20/07/2013 20:30	8.286			6.095
	15	21/07/2013 00:30				
	16	21/07/2013 04:30	13.347			11.156
	17	21/07/2013 08:30				
	18	21/07/2013 12:30	12.197			10.006
	19	21/07/2013 16:30				
	20	21/07/2013 20:30	10.401			8.210
	21	22/07/2013 00:30				
	22	22/07/2013 04:30	8.984			6.793
	23	22/07/2013 08:30				
	24	22/07/2013 12:30	9.722		positif	positif
Relève 5	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	11					
	12					
	13	Tuyau débranché				
	14					
	15					
	16					
	17					
	18					
	19					
	20					
	21					
	22					
	23					
	24					
Relève 6	1					
	2	31/07/2013 05:30	4.8			2.609
	3	31/07/2013 18:30				
	4	01/08/2013 07:30	3.926			1.735
	5	01/08/2013 20:30				
	6	02/08/2013 09:30	3.257	positif faible	positif faible	1.066
	7	02/08/2013 22:30				
	8	03/08/2013 11:30	2.895			0.704
	9	04/08/2013 00:30				
	10	04/08/2013 13:30	2.191	négatif	négatif	0.000
	11	Vide				0.000
	12	05/08/2013 15:30	1.982	négatif	négatif	0.000
	13					0.000
	14					0.000
	15					0.000
	16					0.000
	17					0.000
	18					0.000
	19	Batterie débranchée				0.000
	20					0.000
	21					0.000
	22					0.000
	23					0.000
	24					0.000

**IDDEA**

Traçage Vallée de l'Avre

Traceur

Masse injectée

Lieu de prélèvement

Naphionate de Sodium

2 x 60 kg

Meuvette Moulin Neuf



CETRAHE

75 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 7	1	12/08/2013 13:15	2.135			0.000
	2	13/08/2013 03:15				0.000
	3	13/08/2013 17:15	3.145			0.000
	4	14/08/2013 07:15				0.000
	5	14/08/2013 21:15	1.264			0.000
	6	15/08/2013 11:15				0.000
	7	16/08/2013 01:15	3.215	négatif	négatif	0.000
	8	16/08/2013 15:15				0.000
	9	17/08/2013 05:15	1.512			0.000
	10	17/08/2013 19:15				0.000
	11	18/08/2013 09:15	1.624			0.000
	12	18/08/2013 23:15				0.000
	13	19/08/2013 13:15	2.154			0.000
	14	20/08/2013 03:15				0.000
	15	20/08/2013 17:15	1.564			0.000
	16	21/08/2013 07:15				0.000
	17	21/08/2013 21:15	2.451			0.000
	18	22/08/2013 11:15				0.000
	19	23/08/2013 01:15	3.154			0.000
	20	23/08/2013 15:15				0.000
	21	24/08/2013 05:15	1.264			0.000
	22	24/08/2013 19:15				0.000
	23	25/08/2013 09:15	1.214			0.000
	24	25/08/2013 23:15				0.000

**IDDEA**

**Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur

Naphtionate de Sodium

Masse injectée

2 x 60 kg

Lieu de prélèvement

Meuvette amont résurgences



CETRAHE

20 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 1	1	15/07/2013 12:30	6.214			0.000
	2	15/07/2013 13:30				0.000
	3	15/07/2013 14:30				0.000
	4	15/07/2013 15:30				0.000
	5	15/07/2013 16:30				0.000
	6	15/07/2013 17:30				0.000
	7	15/07/2013 18:30				0.000
	8	15/07/2013 19:30				0.000
	9	15/07/2013 20:30				0.000
	10	15/07/2013 21:30				0.000
	11	15/07/2013 22:30	5.126			0.000
	12	15/07/2013 23:30				0.000
	13	16/07/2013 00:30	5.751			0.000
	14	16/07/2013 01:30	6.126	négatif	négatif	0.000
	15	16/07/2013 02:30	5.487			0.000
	16	16/07/2013 03:30	6.124			0.000
	17	16/07/2013 04:30	7.156			0.000
	18	16/07/2013 05:30	6.247			0.000
	19	16/07/2013 06:30	8.542	négatif	négatif	0.000
	20	16/07/2013 07:30	6.154			0.000
	21	16/07/2013 08:30				0.000
	22	16/07/2013 09:30				0.000
	23	16/07/2013 10:30				0.000
	24	16/07/2013 11:30				0.000
Relève 2	1	16/07/2013 19:00				0.000
	2	16/07/2013 20:00	8.146	négatif	négatif	0.000
	3	16/07/2013 21:00				0.000
	4	16/07/2013 22:00				0.000
	5	16/07/2013 23:00				0.000
	6	17/07/2013 00:00				0.000
	7	17/07/2013 01:00				0.000
	8	17/07/2013 02:00	7.320			0.000
	9	17/07/2013 03:00				0.000
	10	17/07/2013 04:00				0.000
	11	17/07/2013 05:00				0.000
	12	17/07/2013 06:00				0.000
	13	17/07/2013 07:00				0.000
	14	17/07/2013 08:00	6.948			0.000
	15	17/07/2013 09:00				0.000
	16	17/07/2013 10:00				0.000
	17	17/07/2013 11:00				0.000
	18	17/07/2013 12:00				0.000
	19	17/07/2013 13:00				0.000
	20	17/07/2013 14:00	7.548			0.000
	21	17/07/2013 15:00				0.000
	22	17/07/2013 16:00				0.000
	23					0.000
	24					0.000
Relève 3	1	17/07/2013 17:00	8.104			0.000
	2	17/07/2013 18:00				0.000
	3	17/07/2013 19:00				0.000
	4	17/07/2013 20:00				0.000
	5	17/07/2013 21:00				0.000
	6	17/07/2013 22:00				0.000
	7	17/07/2013 23:00	7.851			0.000
	8	18/07/2013 00:00				0.000
	9	18/07/2013 01:00				0.000
	10	18/07/2013 02:00				0.000
	11	18/07/2013 03:00				0.000
	12	18/07/2013 04:00				0.000
	13	18/07/2013 05:00	6.818			0.000
	14	18/07/2013 06:00				0.000
	15	18/07/2013 07:00				0.000
	16	18/07/2013 08:00				0.000
	17	18/07/2013 09:00				0.000
	18	18/07/2013 10:00				0.000
	19	18/07/2013 11:00	7.209			0.000
	20	18/07/2013 12:00				0.000
	21	18/07/2013 13:00				0.000
	22	18/07/2013 14:00				0.000
	23	18/07/2013 15:00				0.000
	24	18/07/2013 16:00				0.000

**IDDEA**

**Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur

Naphtionate de Sodium

Masse injectée

2 x 60 kg

Lieu de prélèvement

**Meuvette amont résurgences**



CETRAHE

20 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 4	1	18/07/2013 17:00	17.867	négatif	négatif	0.000
	2	18/07/2013 21:00				0.000
	3	19/07/2013 01:00				0.000
	4	19/07/2013 05:00				0.000
	5	19/07/2013 09:00				0.000
	6	19/07/2013 13:00				0.000
	7	19/07/2013 17:00	16.632			0.000
	8	19/07/2013 21:00				
	9	20/07/2013 01:00				
	10	20/07/2013 05:00				
	11	20/07/2013 09:00				
	12	20/07/2013 13:00				
	13	20/07/2013 17:00				
	14	20/07/2013 21:00				
	15	21/07/2013 01:00				
	16	21/07/2013 05:00				
	17	21/07/2013 09:00				
	18	21/07/2013 13:00				
	19	21/07/2013 17:00				
	20	21/07/2013 21:00				
	21	22/07/2013 01:00				
	22	22/07/2013 05:00				
	23	22/07/2013 09:00				
	24	22/07/2013 13:00				
Relève 5	1	22/07/2013 17:00				
	2	23/07/2013 01:00				
	3	23/07/2013 09:00				
	4	23/07/2013 17:00				
	5	24/07/2013 01:00				
	6	24/07/2013 09:00				
	7	24/07/2013 17:00				
	8	25/07/2013 01:00				
	9	25/07/2013 09:00				
	10	25/07/2013 17:00				
	11	26/07/2013 01:00				
	12	26/07/2013 09:00				
	13	26/07/2013 17:00				
	14	27/07/2013 01:00				
	15	27/07/2013 09:00				
	16	27/07/2013 17:00				
	17	28/07/2013 01:00				
	18	28/07/2013 09:00				
	19	28/07/2013 17:00				
	20	29/07/2013 01:00				
	21	29/07/2013 09:00				
	22	29/07/2013 17:00				
	23	30/07/2013 01:00				
	24	30/07/2013 09:00				
Relève 6	1	30/07/2013 17:30				
	2	31/07/2013 06:30				
	3	31/07/2013 19:30				
	4	01/08/2013 08:30				
	5	01/08/2013 21:30				
	6	02/08/2013 10:30				
	7	02/08/2013 23:30				
	8	03/08/2013 12:30				
	9	04/08/2013 01:30				
	10	04/08/2013 14:30				
	11	05/08/2013 03:30				
	12	05/08/2013 16:30				
	13	06/08/2013 05:30				
	14	06/08/2013 18:30				
	15	07/08/2013 07:30				
	16	07/08/2013 20:30				
	17	08/08/2013 09:30				
	18	08/08/2013 22:30				
	19	09/08/2013 11:30				
	20	10/08/2013 00:30				
	21	10/08/2013 13:30				
	22	11/08/2013 02:30				
	23	11/08/2013 15:30				
	24	12/08/2013 04:30				

**IDDEA****Traçage Vallée de l'Avre**

Traceur Naphtionate de Sodium  
Masse injectée 2 x 60 kg  
Lieu de prélèvement **Meuvette amont résurgences**



CETRAHE

20 analyses

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Relève 7	1	12/08/2013 17:00				
	2	13/08/2013 07:00				
	3	13/08/2013 21:00				
	4	14/08/2013 11:00				
	5	15/08/2013 01:00				
	6	15/08/2013 15:00				
	7	16/08/2013 05:00				
	8	16/08/2013 19:00				
	9	17/08/2013 09:00				
	10	17/08/2013 23:00				
	11	18/08/2013 13:00				
	12	19/08/2013 03:00				
	13	19/08/2013 17:00				
	14	20/08/2013 07:00				
	15	20/08/2013 21:00				
	16	21/08/2013 11:00				
	17	22/08/2013 01:00				
	18	22/08/2013 15:00				
	19	23/08/2013 05:00				
	20	23/08/2013 19:00				
	21	24/08/2013 09:00				
	22	24/08/2013 23:00				
	23	25/08/2013 13:00				
	24	26/08/2013 03:00				

**IDDEA**

Traçage Vallée de l'Avre

Traceur Naphionate de Sodium

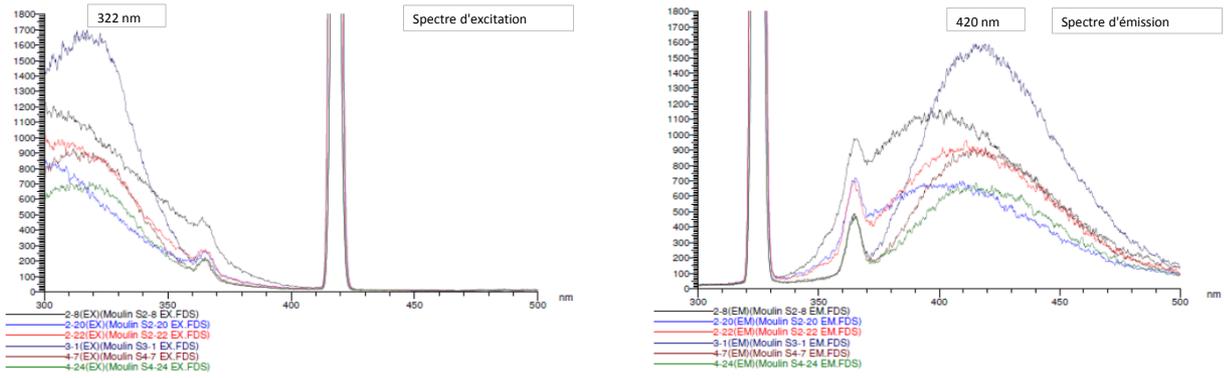
Masse injectée 2 x 60 kg

Lieu de prélèvement **Ponctuels**

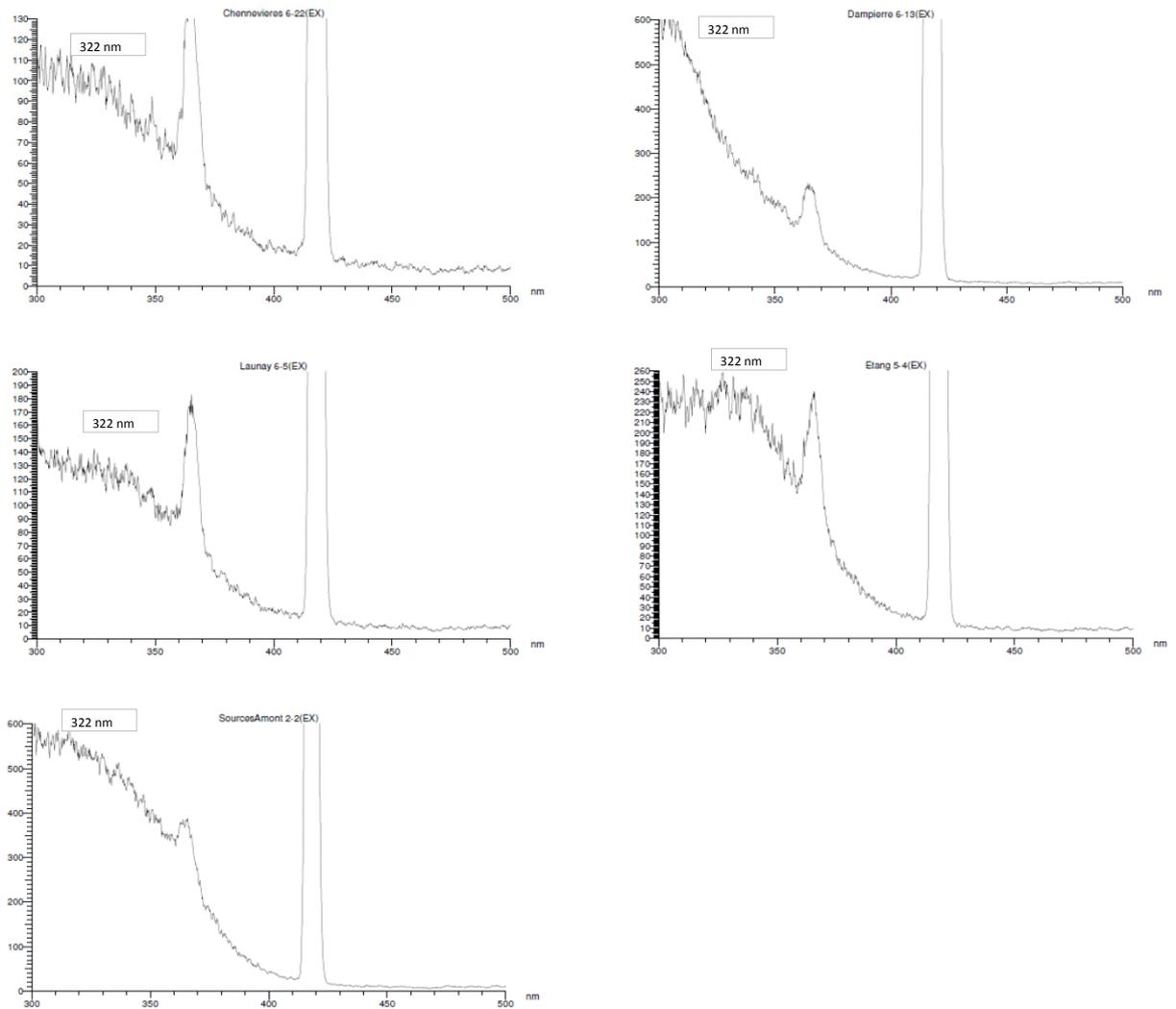
CETRAHE

Remarques	N° d'éch.	Date	Conc. Brute en ng/mL	Spectre émission	Spectre excitation	C° nette en ng/mL
Resurgence 1	1					
	2	17/07/2013 15:10	258.784			258.740
	3	18/07/2013 16:36	89.574			89.530
	4	22/07/2013 15:10	12.137			12.093
	5	30/07/2013 15:15	3.553			3.509
	6	12/08/2013 14:15	0.044	négatif	négatif	0.000
	7					
Resurgence 2	1					
	2	17/07/2013 15:20	269.785			269.272
	3	18/07/2013 16:43	94.245			93.732
	4	22/07/2013 15:20	15.384			14.871
	5	30/07/2013 15:25	4.354			3.841
	6	12/08/2013 14:25	0.513	négatif	négatif	0.000
	7					
Resurgence 3	1					
	2	17/07/2013 15:30	158.145			157.488
	3	18/07/2013 15:47	68.147			67.490
	4	22/07/2013 15:30	11.089			10.432
	5	30/07/2013 15:35	3.178			2.521
	6	12/08/2013 14:35	0.657	négatif	négatif	0.000
	7					
Resurgence 4	1					
	2	17/07/2013 15:40	245.478			245.178
	3	18/07/2013 16:51	182.147			181.847
	4	22/07/2013 15:40	11.689			11.389
	5	30/07/2013 15:45	3.305			3.005
	6	12/08/2013 14:45	0.311	négatif	négatif	0.000
	7					
Resurgence 5	1					
	2	17/07/2013 15:50	7.131			7.131
	3	18/07/2013 16:55	7.845			7.845
	4	22/07/2013 15:50	8.271			8.271
	5	30/07/2013 15:55	19.677			19.677
	6	12/08/2013 14:55	10.687			10.687
	7					
Erigny	1	16/07/2013 14:38	0.58			0.000
	2	17/07/2013 15:18	0.312			0.000
	3	18/07/2013 15:07	0.61			0.000
	4	22/07/2013 15:38	0.612	négatif	négatif	0.000
	5	30/07/2013 15:25	0.735	négatif	négatif	0.000
	6	12/08/2013 16:08	0.715			0.000
	7	26/08/2013 15:22	0.334			0.000

**MOULIN Naphionate (322nm/420nm) spectres positifs**



**Quelques autres exemples de spectres Négatifs**



ANNEXE 4 :

INTERPRETATION RESTITUTION SUR LA MEUVETTE AU MOULIN NEUF



## Paramètres du transit

Traçage depuis La Meuvette  
Restitution La Meuvette au Moulin Neuf

Injection de 60 Kg de Naphtionate de Sodium le 15/7/2013 à 20 h 30 min



Distance entre le point d'injection et le point de restitution : 5.08 km

CETRAHE



### Description de la courbe de restitution

Début de la restitution le 17/7/2013 à 15 h 30 min  
Fin de la restitution le 22/7/2013 à 12 h 30 min  
Durée de la restitution : 117 heures  
Temps minimum de transit : 43 heures  
Vitesse maximale de transit : 118.23 m/h  
Temps modal de transit : 52 heures  
Vitesse modale de transit : 97.77 m/h  
Maximum de la restitution unitaire : 0,02E-09 L-1

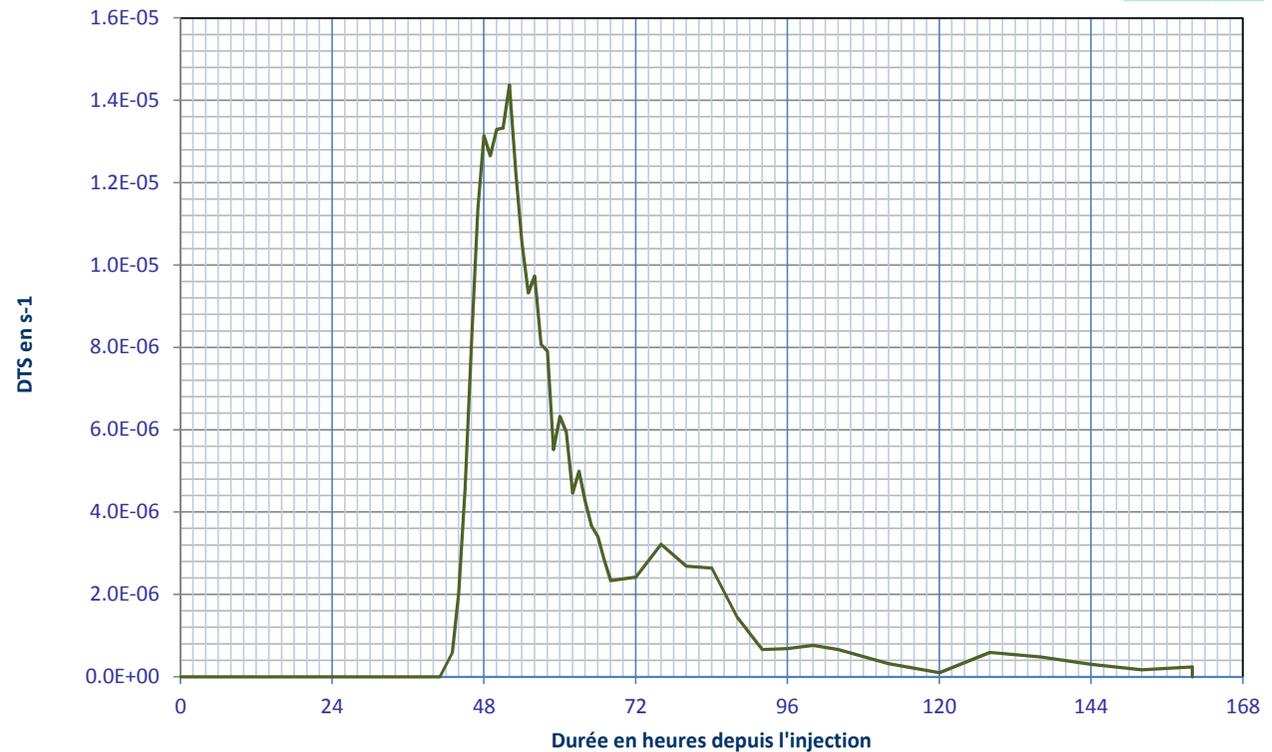
### Caractéristiques de la DTS

Temps moyen de séjour : 65.37 heures  
Vitesse apparente de transit : 77.78 m/h  
Vitesse moyenne de transit : 84.27 m/h  
Masse de traceur restitué : 1.575 kg  
Bilan de restitution : 2.63 %  
Maximum de la DTS : 1.4E-05 s<sup>-1</sup>

### Volumes caractéristiques :

Volume avant restitution : 23706 m<sup>3</sup>  
Volume pendant restitution : 65605 m<sup>3</sup>  
Volume de Allen : 36036 m<sup>3</sup>  
Section de Allen : 7.09 m<sup>2</sup>

### Distribution des Temps de Séjour



## Paramètres du transit

Traçage depuis La Gervaine  
Restitution La Meuvette au Moulin Neuf

Injection de 60 Kg de Naphtionate de Sodium le 15/7/2013 à 22 h 2 min

Distance entre le point d'injection et le point de restitution : 5.76 km

CETRAHE



### Description de la courbe de restitution

Début de la restitution le 17/7/2013 à 15 h 30 min  
Fin de la restitution le 22/7/2013 à 12 h 30 min  
Durée de la restitution : 117 heures  
Temps minimum de transit : 41.47 heures  
Vitesse maximale de transit : 139 m/h  
Temps modal de transit : 50.47 heures  
Vitesse modale de transit : 114.21 m/h  
Maximum de la restitution unitaire : 0,02E-09 L-1

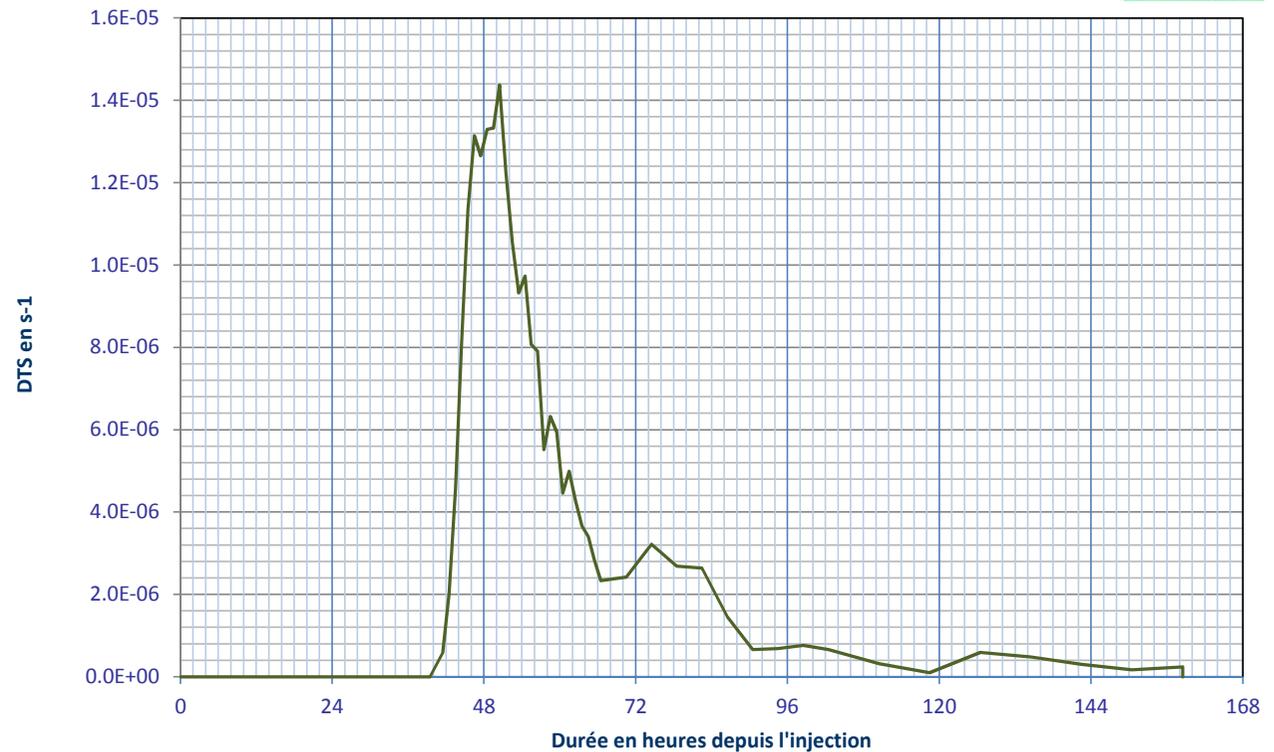
### Caractéristiques de la DTS

Temps moyen de séjour : 63.83 heures  
Vitesse apparente de transit : 90.3 m/h  
Vitesse moyenne de transit : 98.19 m/h  
Masse de traceur restitué : 1.575 kg  
Bilan de restitution : 2.63 %  
Maximum de la DTS : 1.4E-05 s<sup>-1</sup>

### Volumes caractéristiques :

Volume avant restitution : 22861 m<sup>3</sup>  
Volume pendant restitution : 65605 m<sup>3</sup>  
Volume de Allen : 35191 m<sup>3</sup>  
Section de Allen : 6.11 m<sup>2</sup>

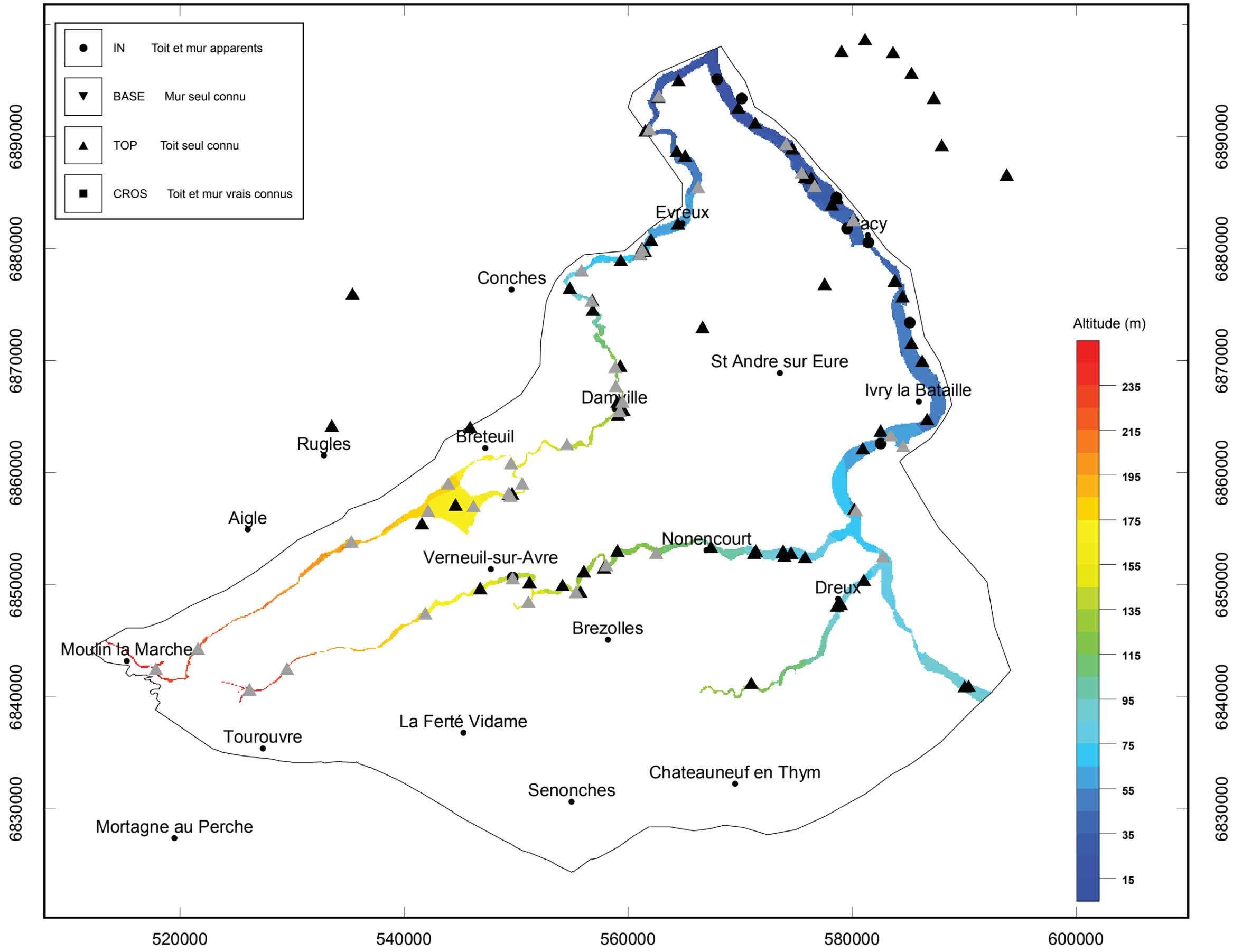
### Distribution des Temps de Séjour



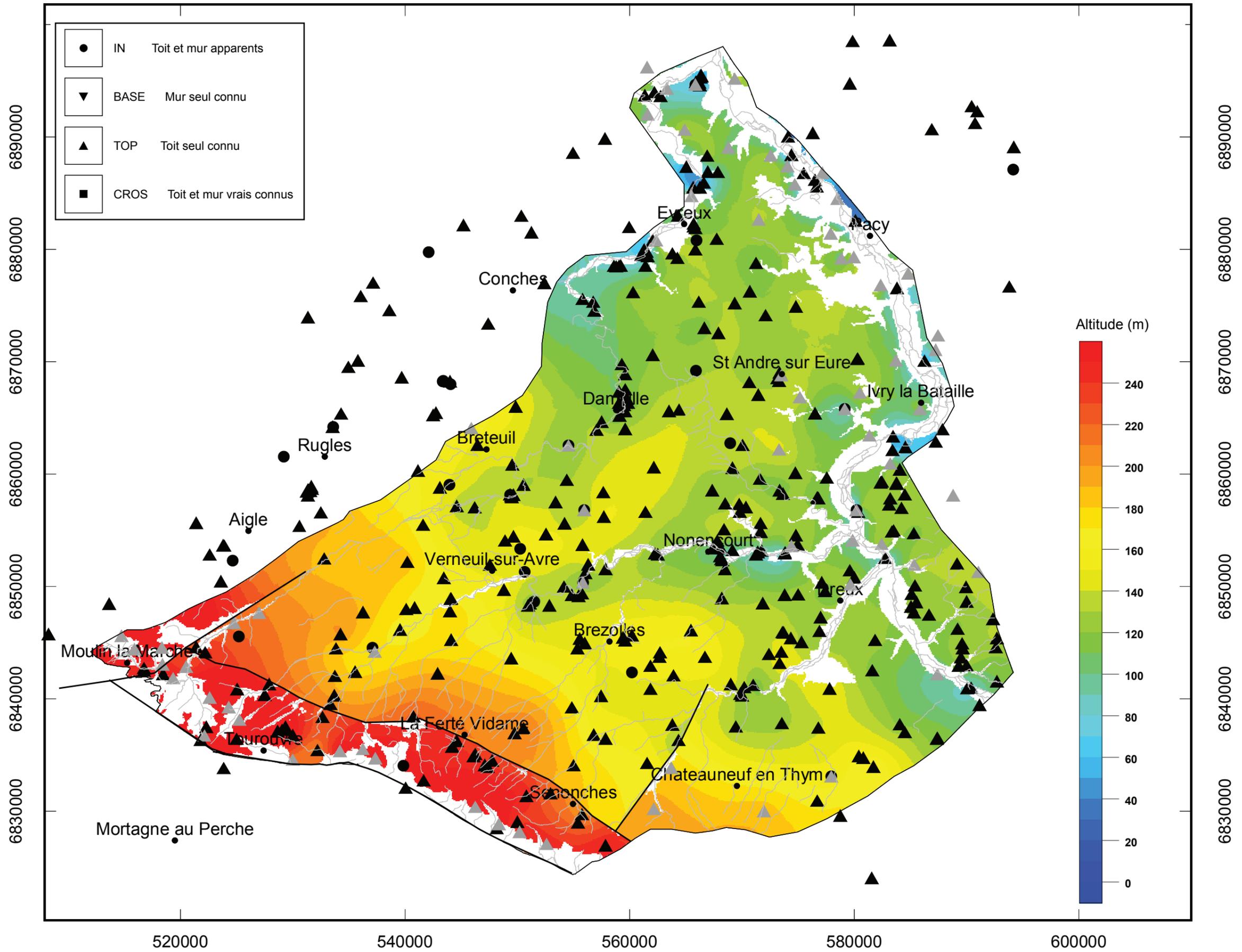
**Annexe 2**  
-  
**Carte des altitudes des formations modélisées (Grille  
2D)**



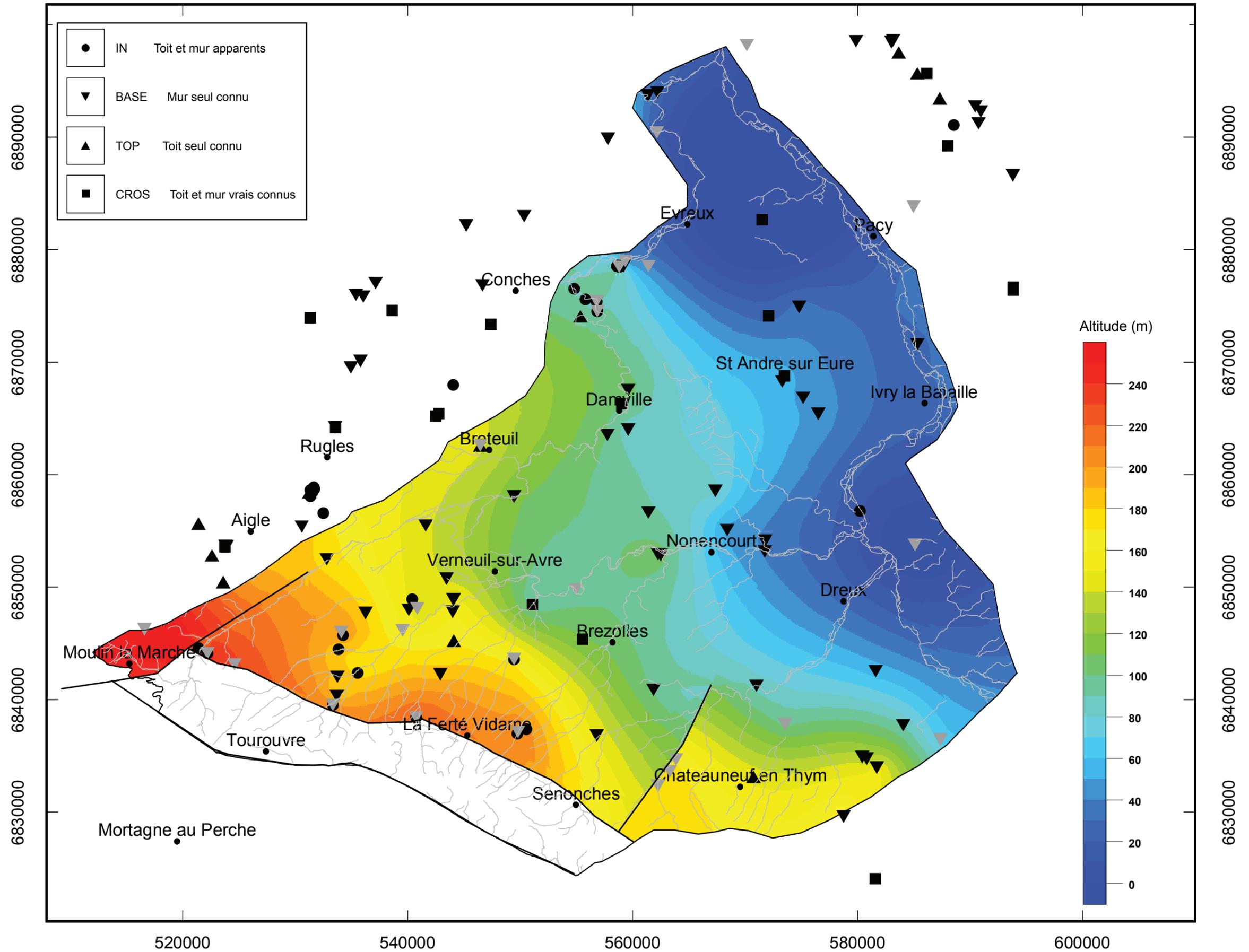
# base ALLUvions



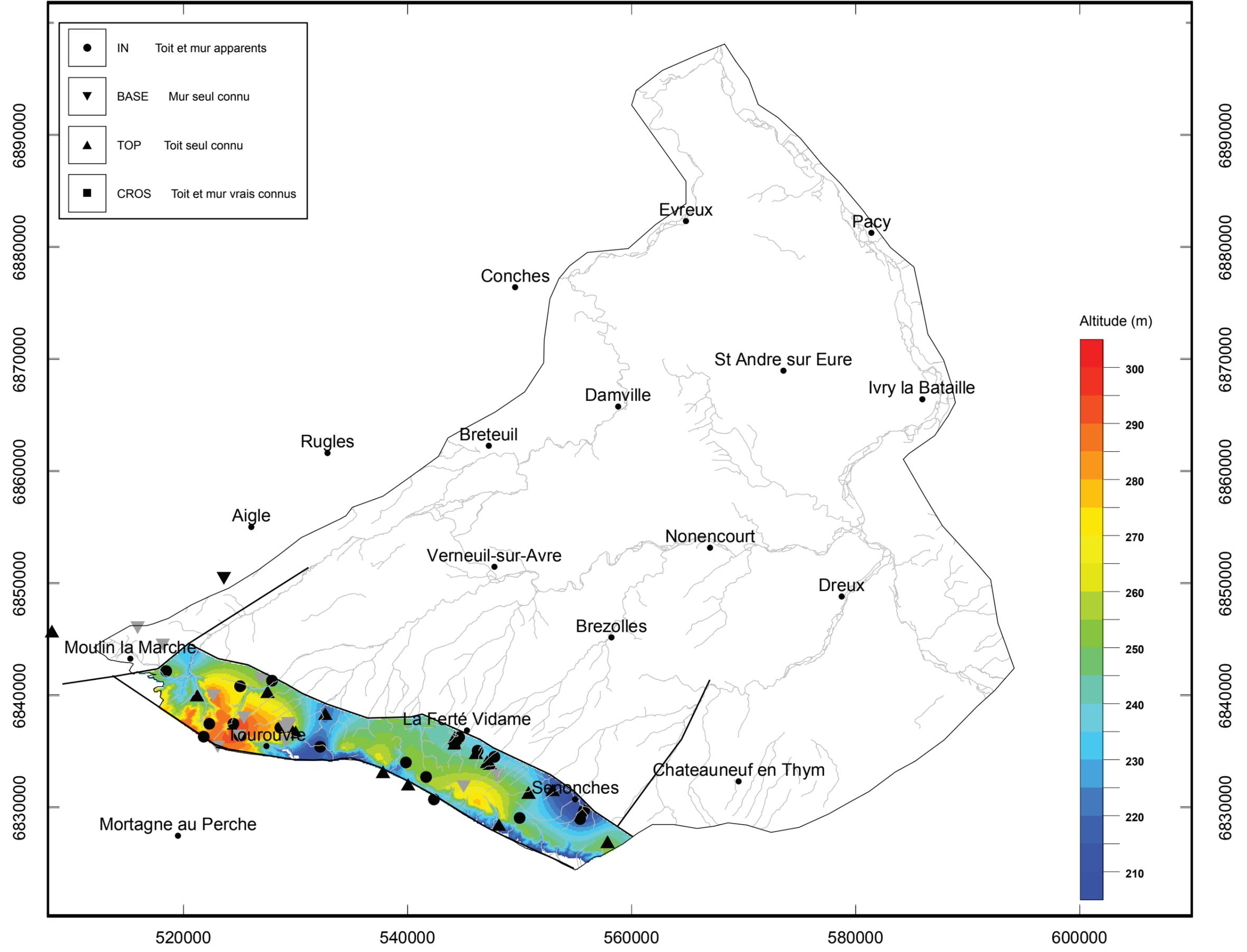
# base ARGiles à Silex



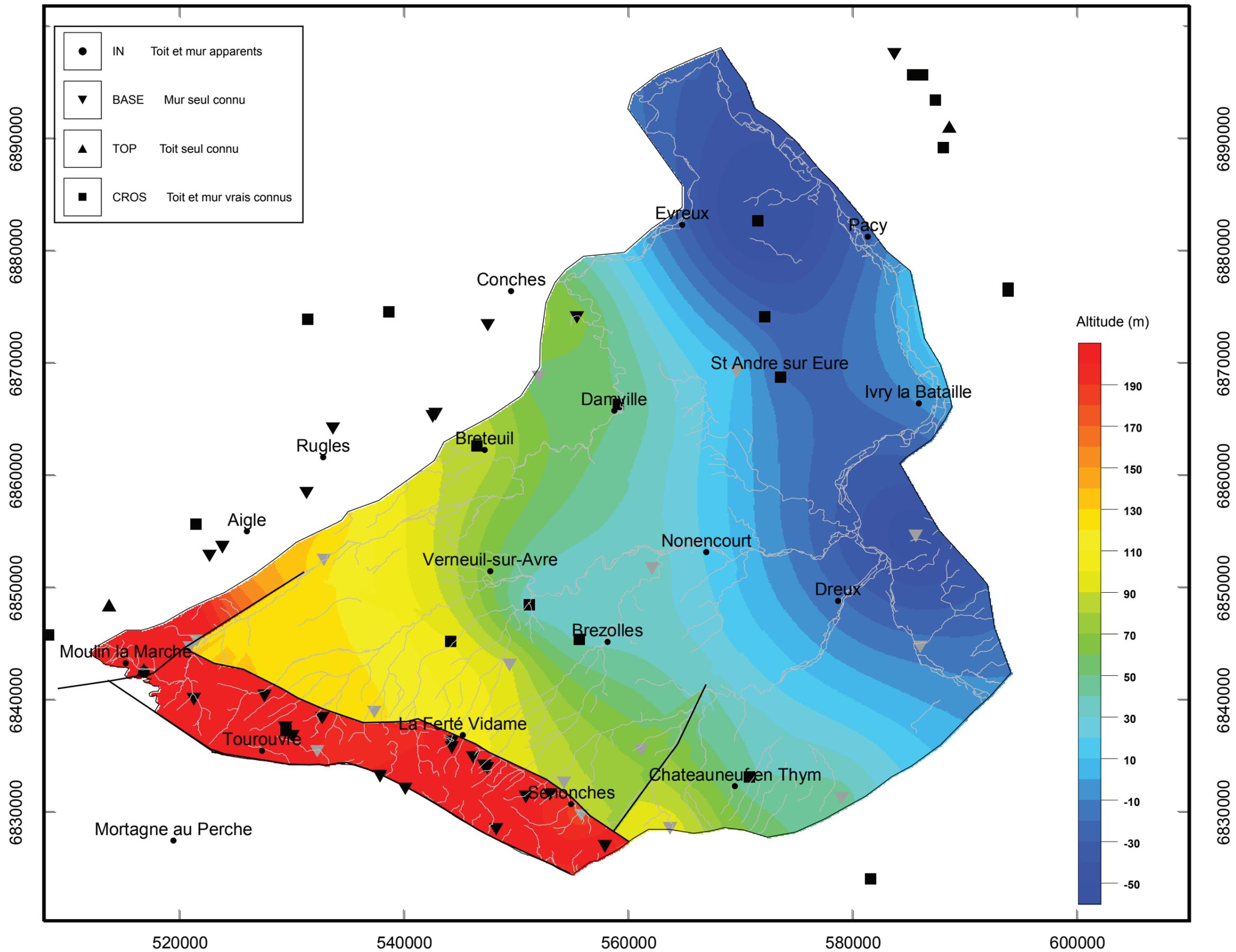
# toit CENomanien Superieur



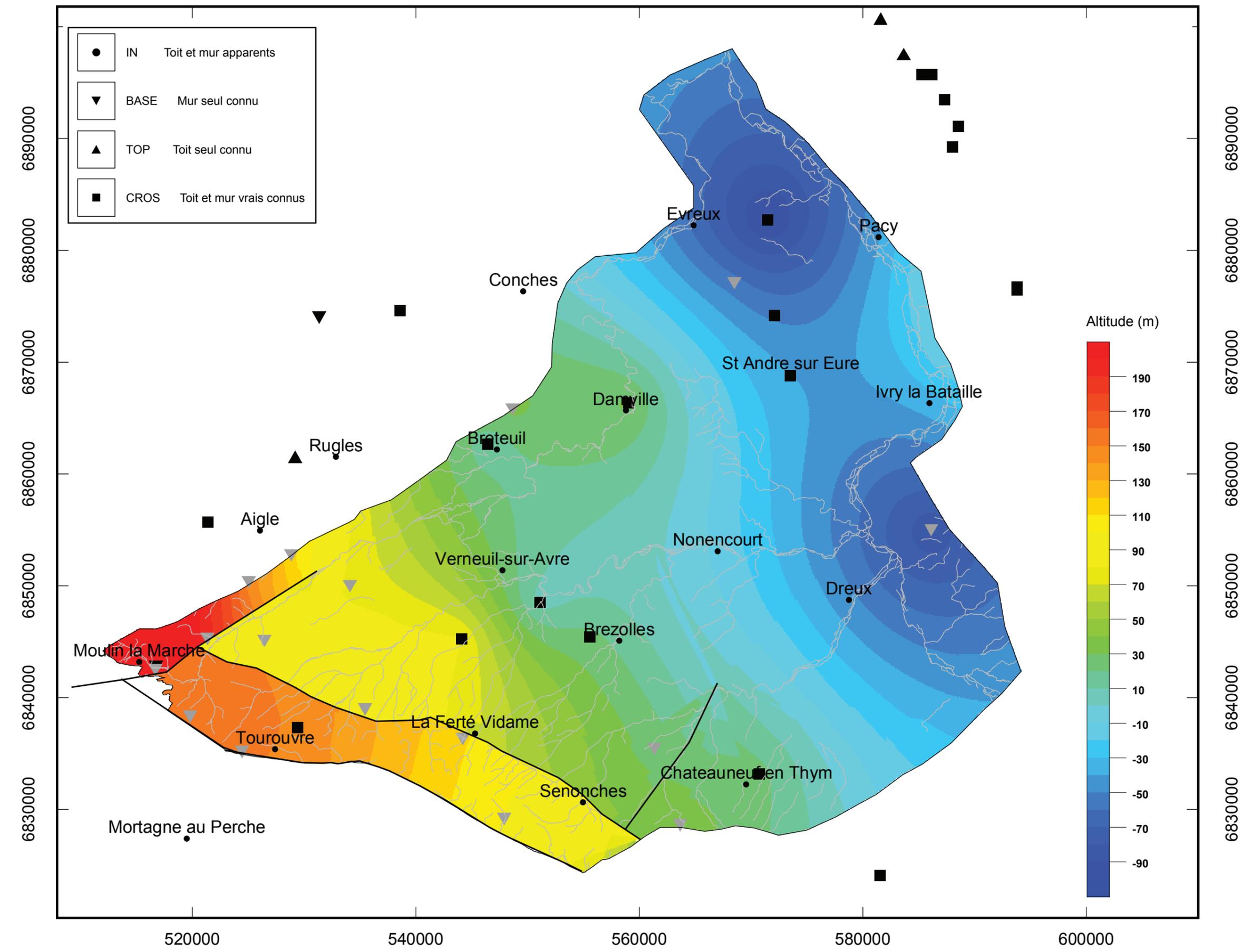
# toit sable du PERChe



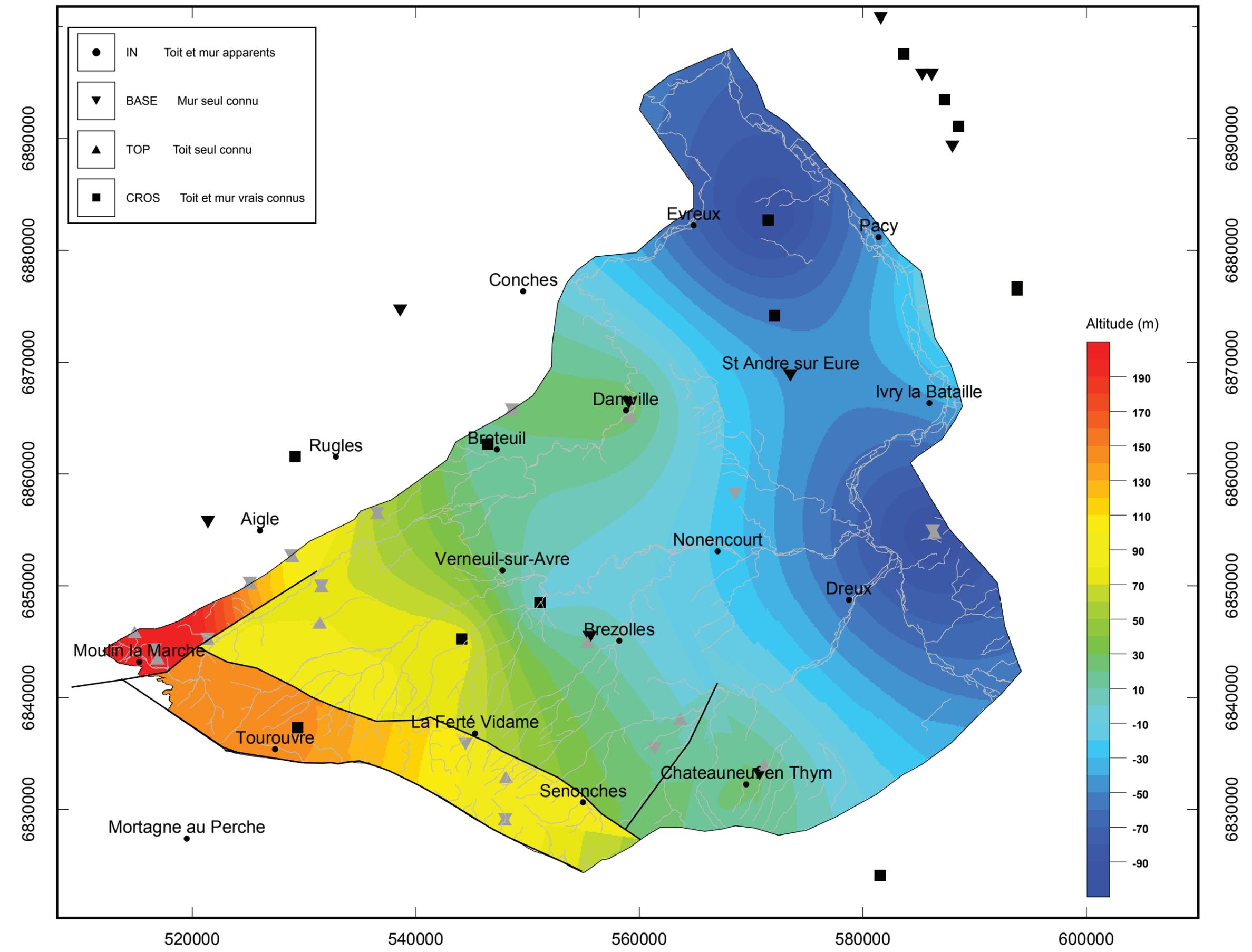
# toit CENomanien Inferieur



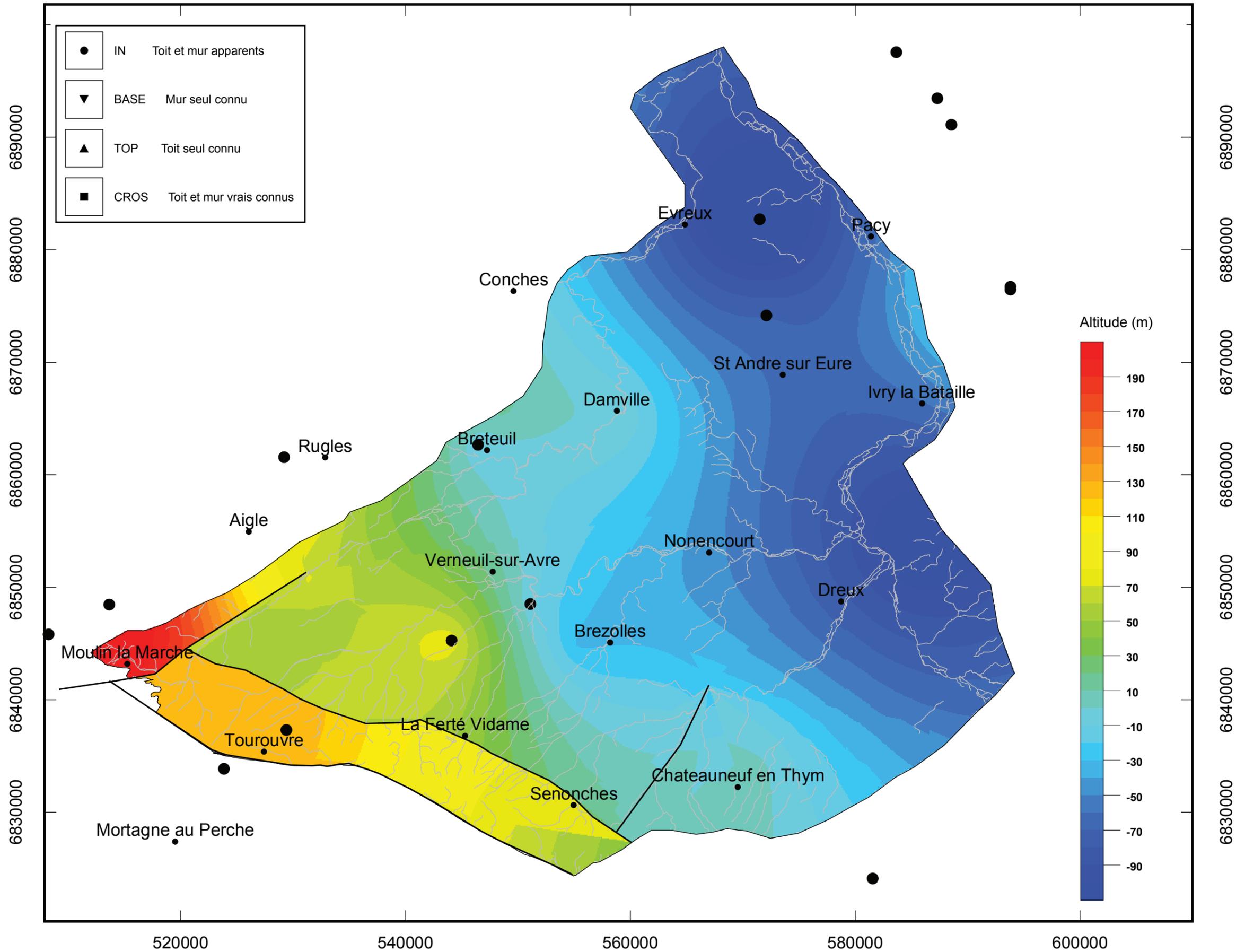
# toit CENomanien Basal



# toit GAULT



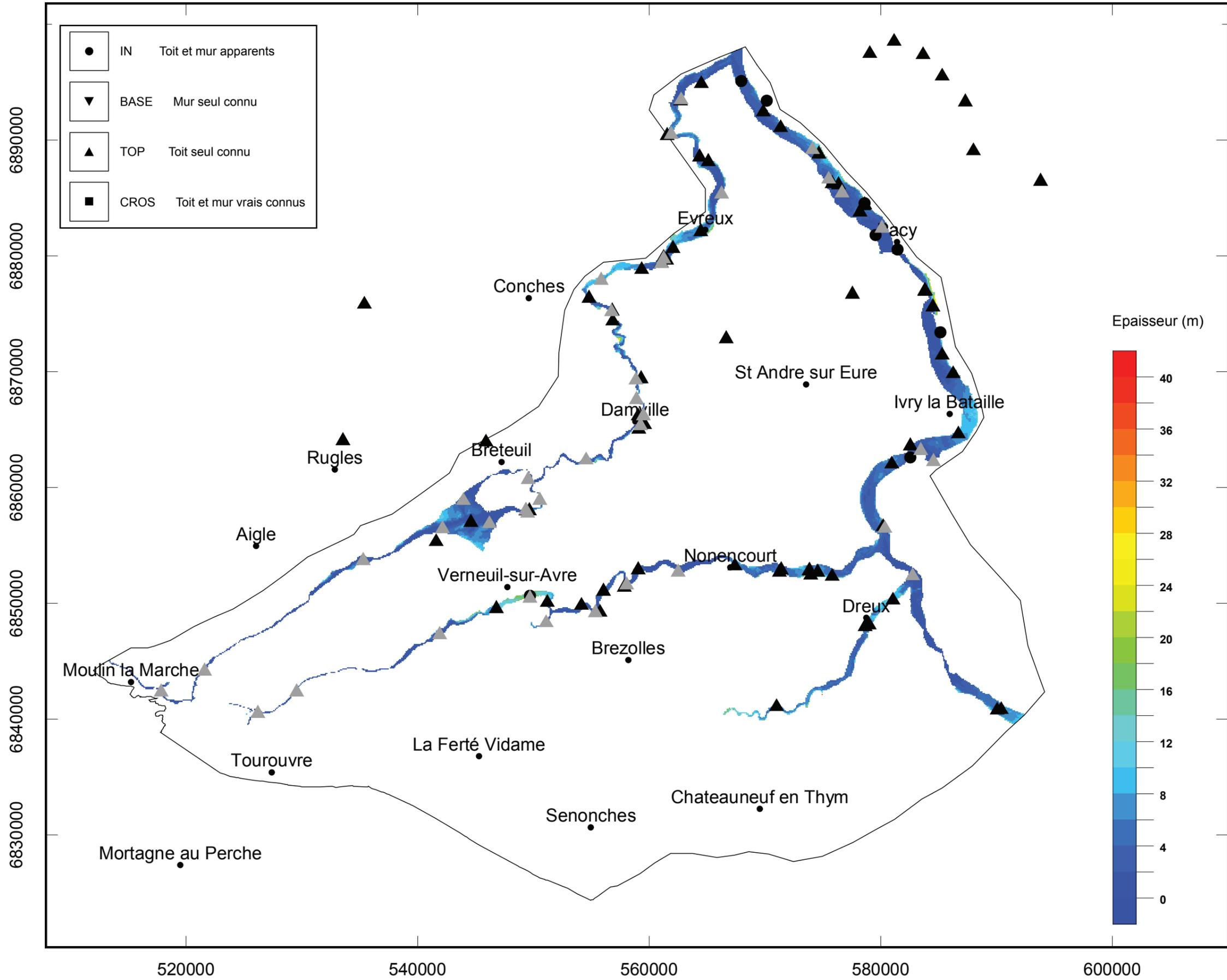
# Base GAULT



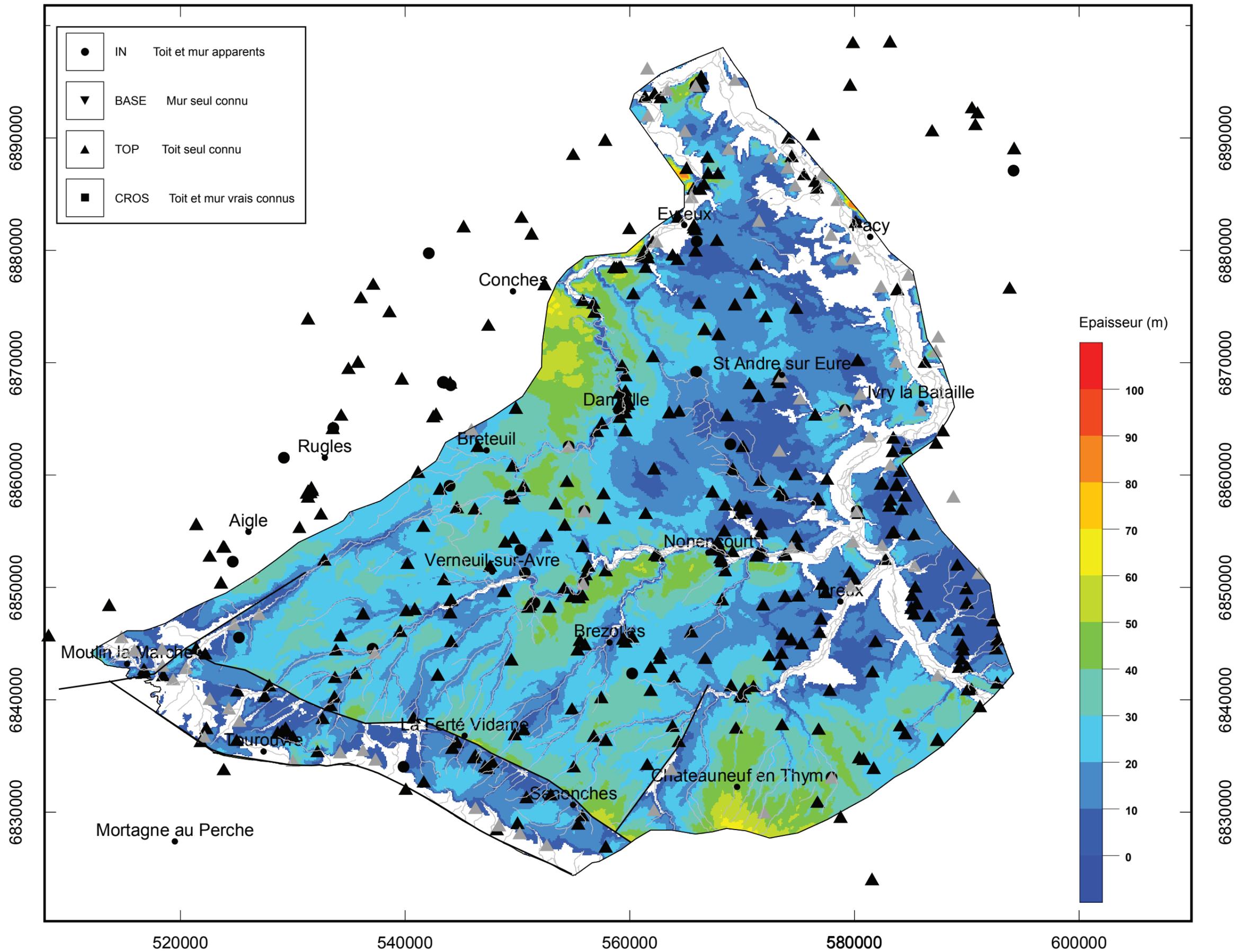
**Annexe 3**  
-  
**Carte des épaisseurs des formations modélisées  
(Grille 2D)**



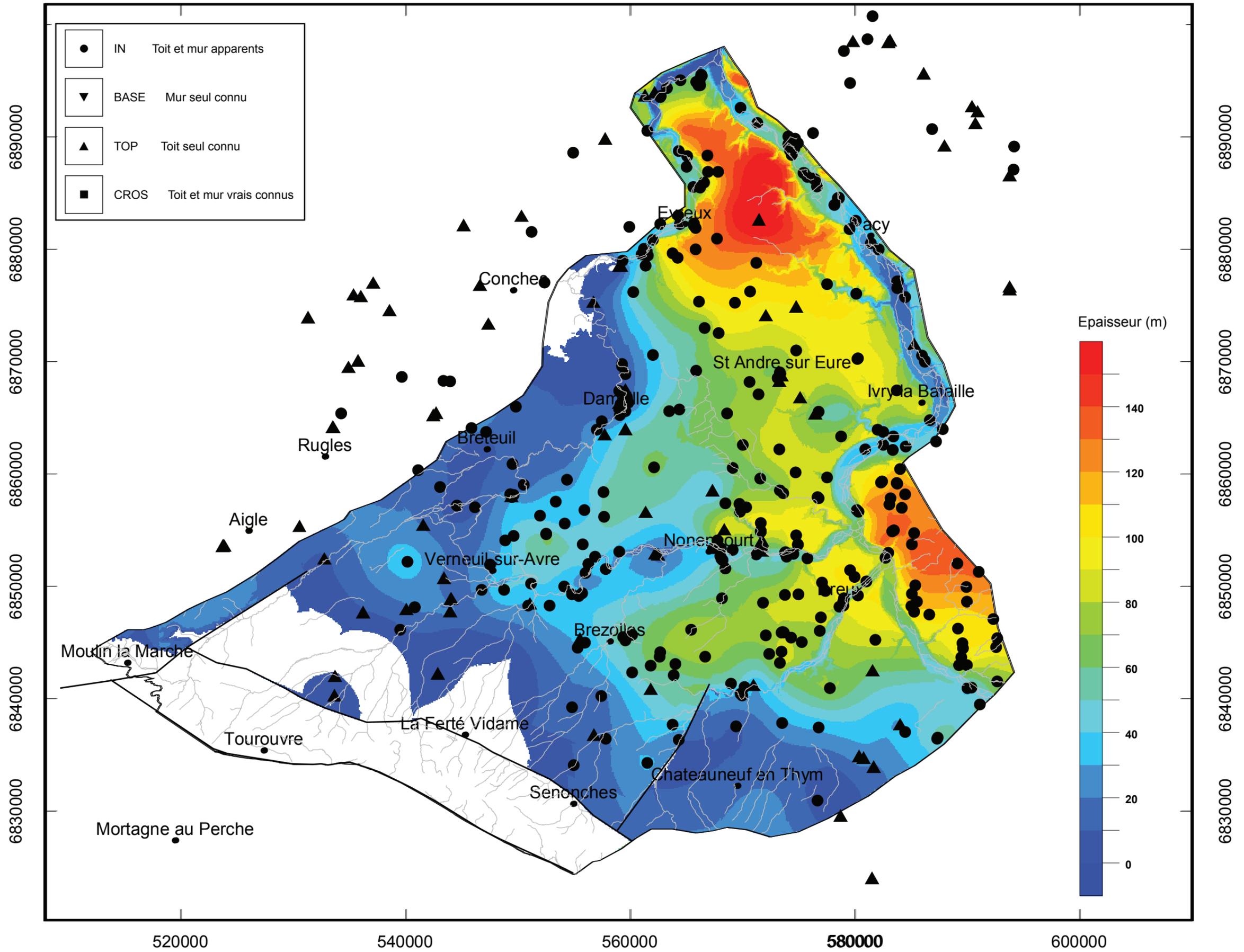
# ALLUvions



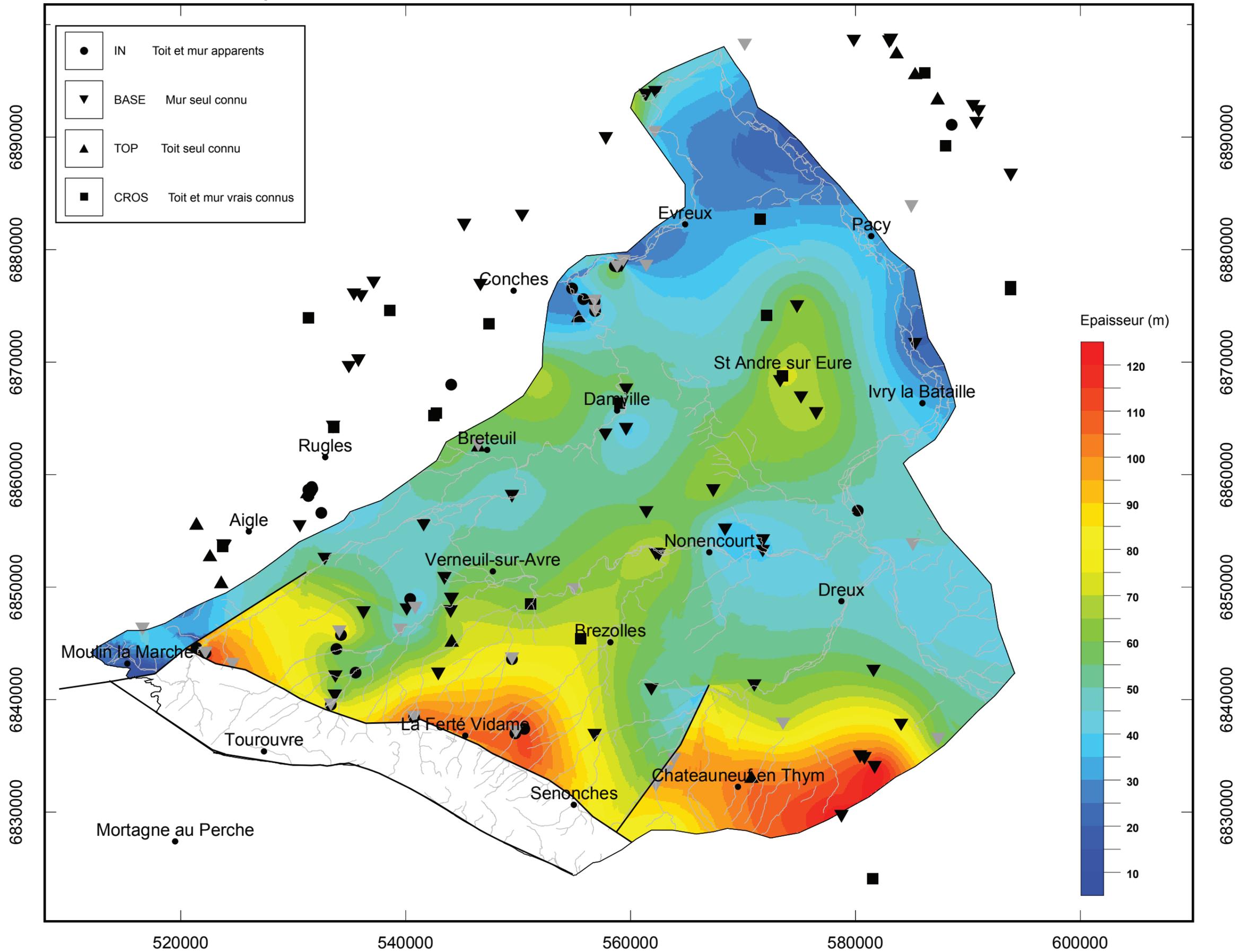
# ARGiles à Silex



# SENOnien

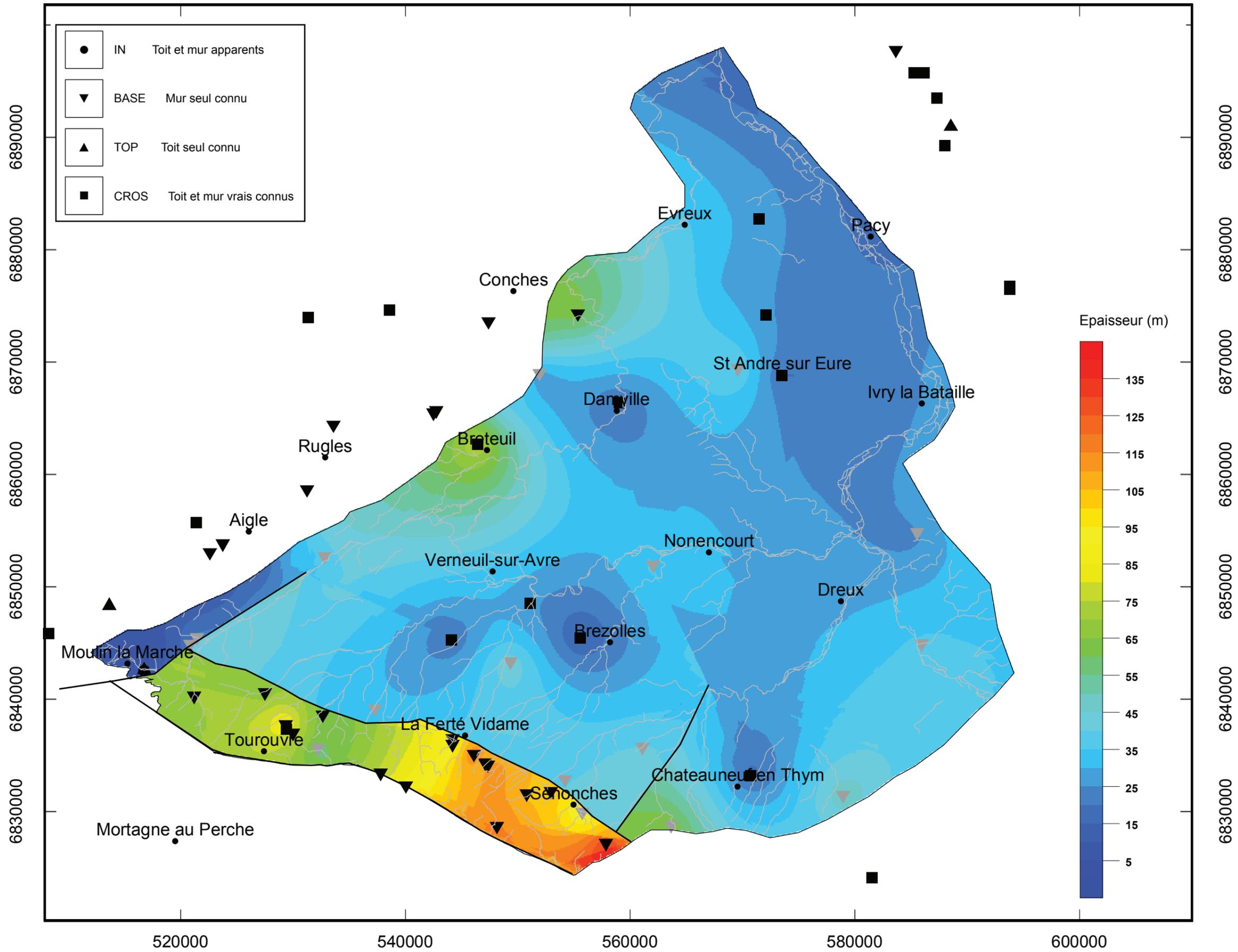


# CENomanien Supérieur

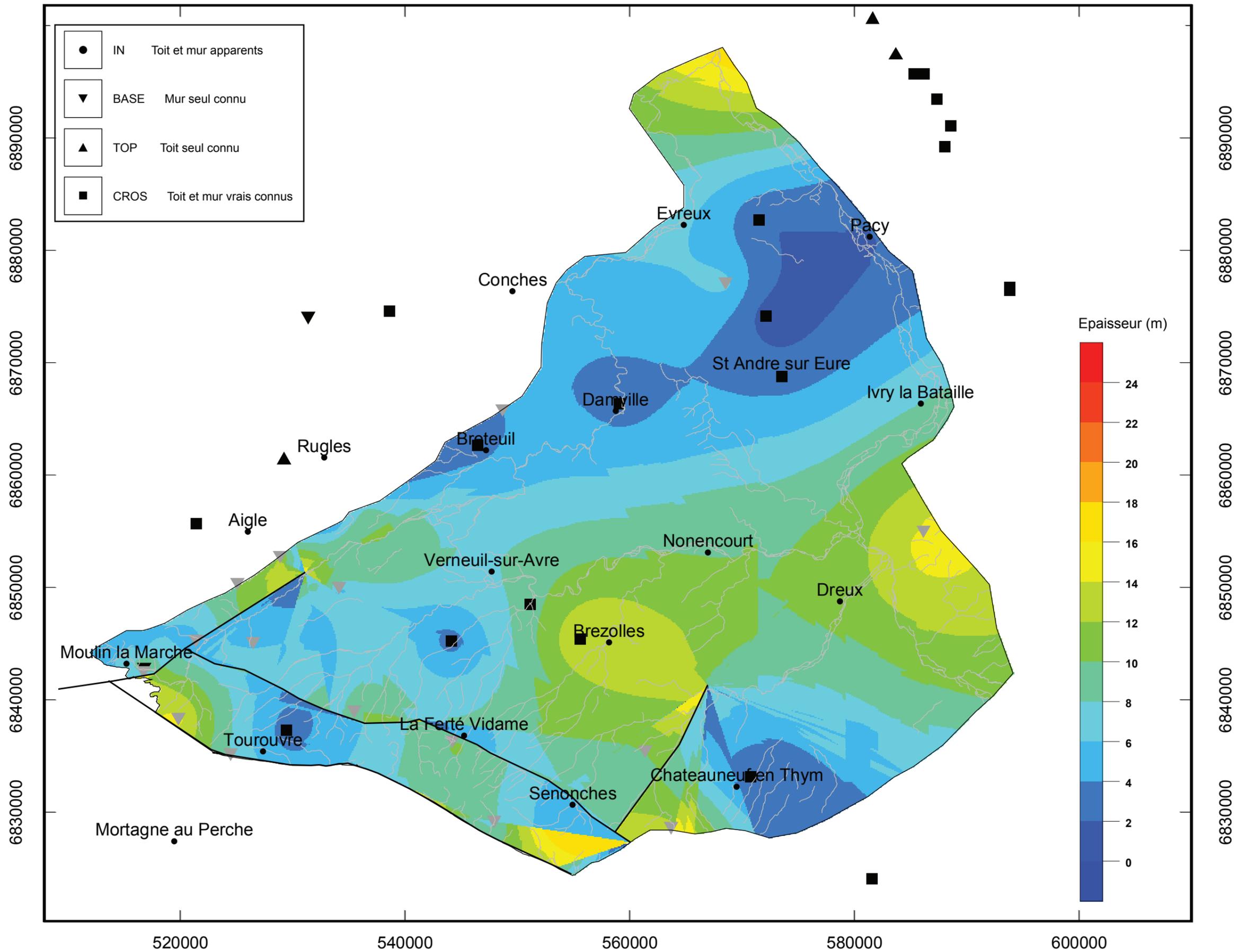




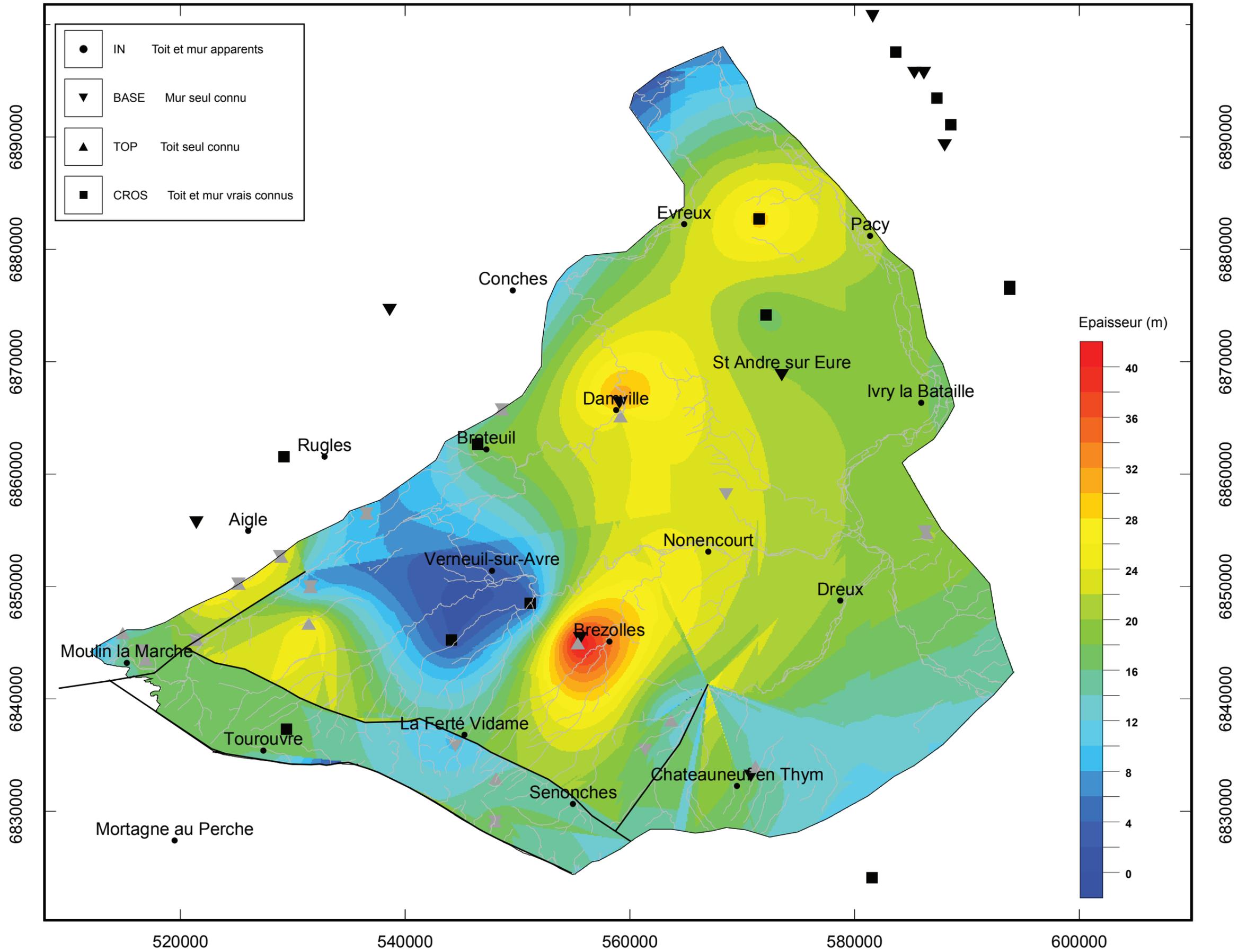
# CENomanien Inferieur



# CENomanien Basal



# GAULT



## **Annexe 4**

-

### **Carte de localisation des coupes verticales**



Coupe	Coord X (m)		Coord Y (m)	
<b>SSW-NNE</b>				
5	X1	519153	Y1	6833528
	X2	584778	Y2	6900577.5
11	X1	538943	Y1	6825374.5
	X2	596968	Y2	6888149
15	X1	554380	Y1	6881974.5
	X2	606626	Y2	6821179
<b>W-E</b>				
3	X1	516303	Y1	6855298
	X2	569183	Y2	6825296
6	X1	525565	Y1	6865509
	X2	588181	Y2	6828700
9	X1	535540	Y1	6876513
	X2	594593	Y2	6839307
15	X1	554301	Y1	6891553
	X2	604963	Y2	6860997



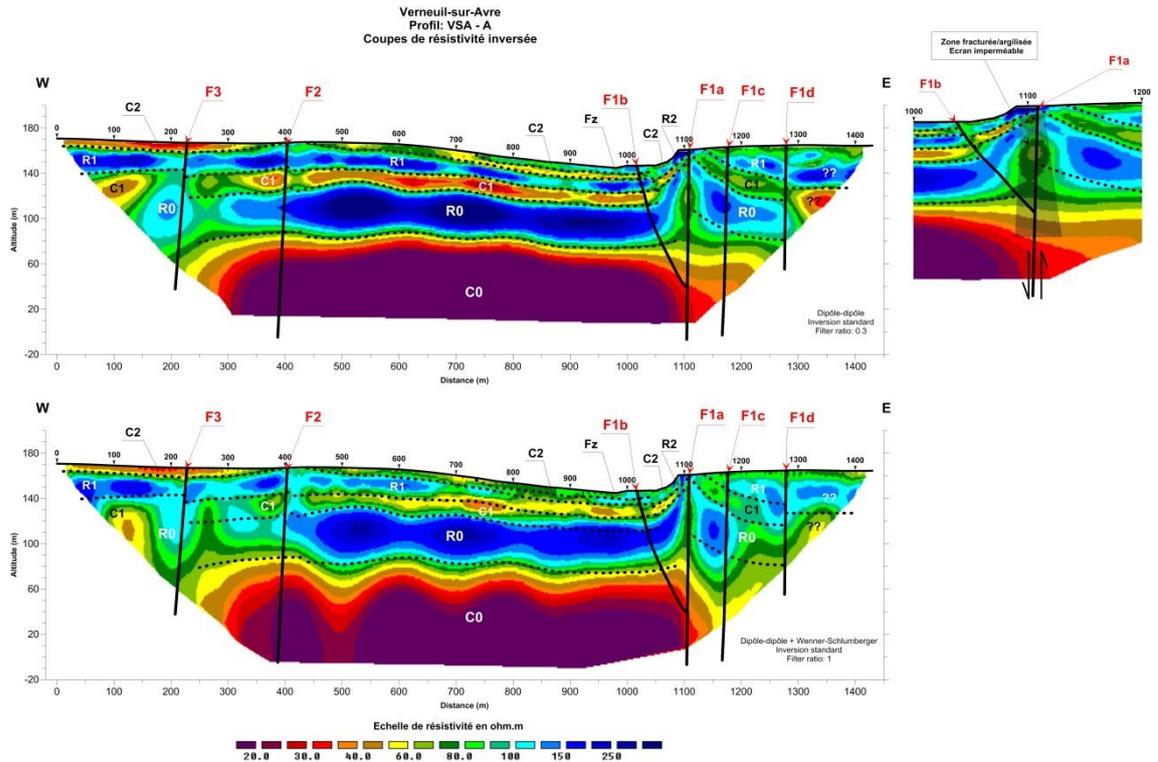
**Annexe 5**  
-  
**Résultats de la campagne de géophysique de 2013**

Les illustrations qui suivent, présentent les résultats des inversions des données de résistivité apparentes mesurées sur le terrain. Elles sont construites de la manière suivante : elles sont composées à chaque fois de 2 coupes :

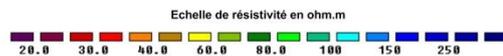
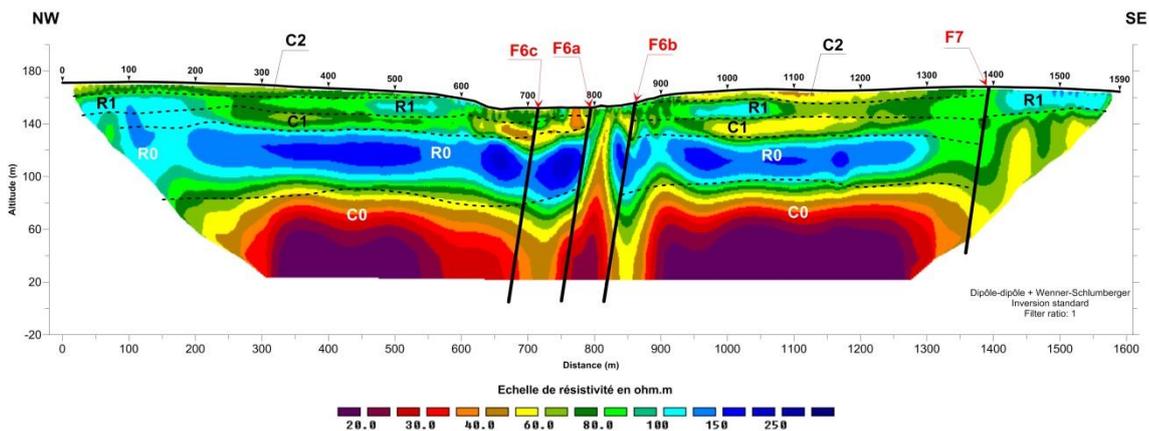
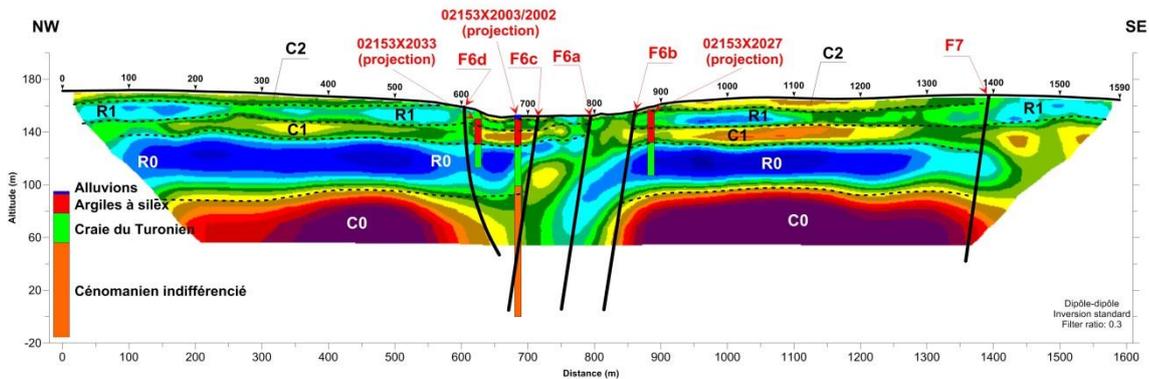
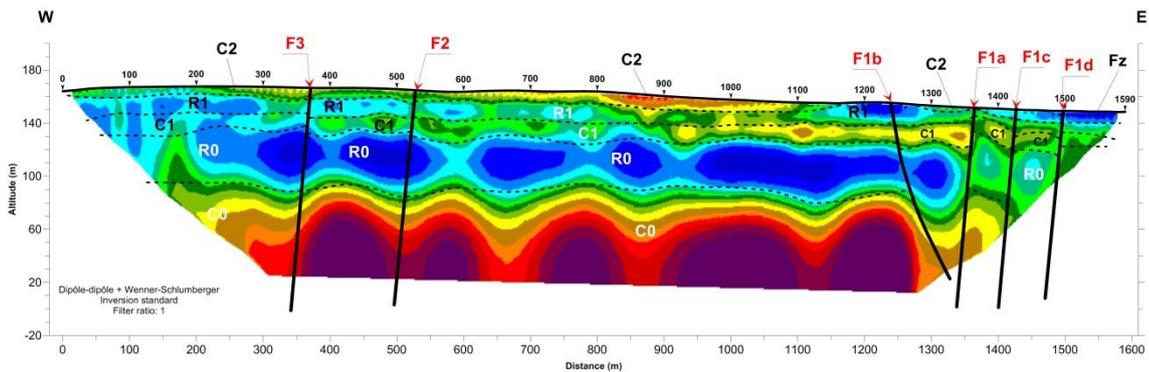
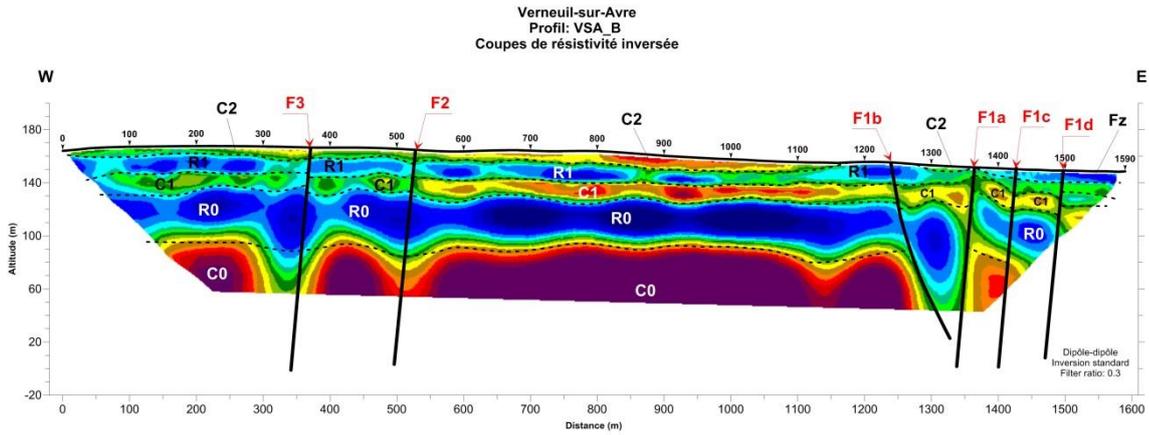
- la première coupe (celle du haut) montre le résultat de l'inversion des données acquises selon le dispositif dipôle-dipôle. Y figurent également des informations géologiques et structurales (interfaces et discontinuités). Les paramètres utilisés (cf. Annexe 2) pour l'inversion sont des paramètres « standard » avec un « flatness filter ratio de 0.3 » (favorisant la caractérisation des structures tabulaires) ;
- la seconde coupe (celle du bas) montre le résultat de l'inversion conjointe des données acquises selon les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger, inversion réalisée avec des paramètres « standard » avec un « flatness filter ratio de 1 » » (ne présupposant pas *a priori* de l'orientation des interfaces géo-électriques, tabulaires ou verticaux) ;
- les horizons ou structures géo-électriques identifiés sont notés :
  - C pour conducteur,
  - R pour résistant,
  - F pour discontinuité (dans le cas de cette étude, ces discontinuités sont attribuées à des failles).

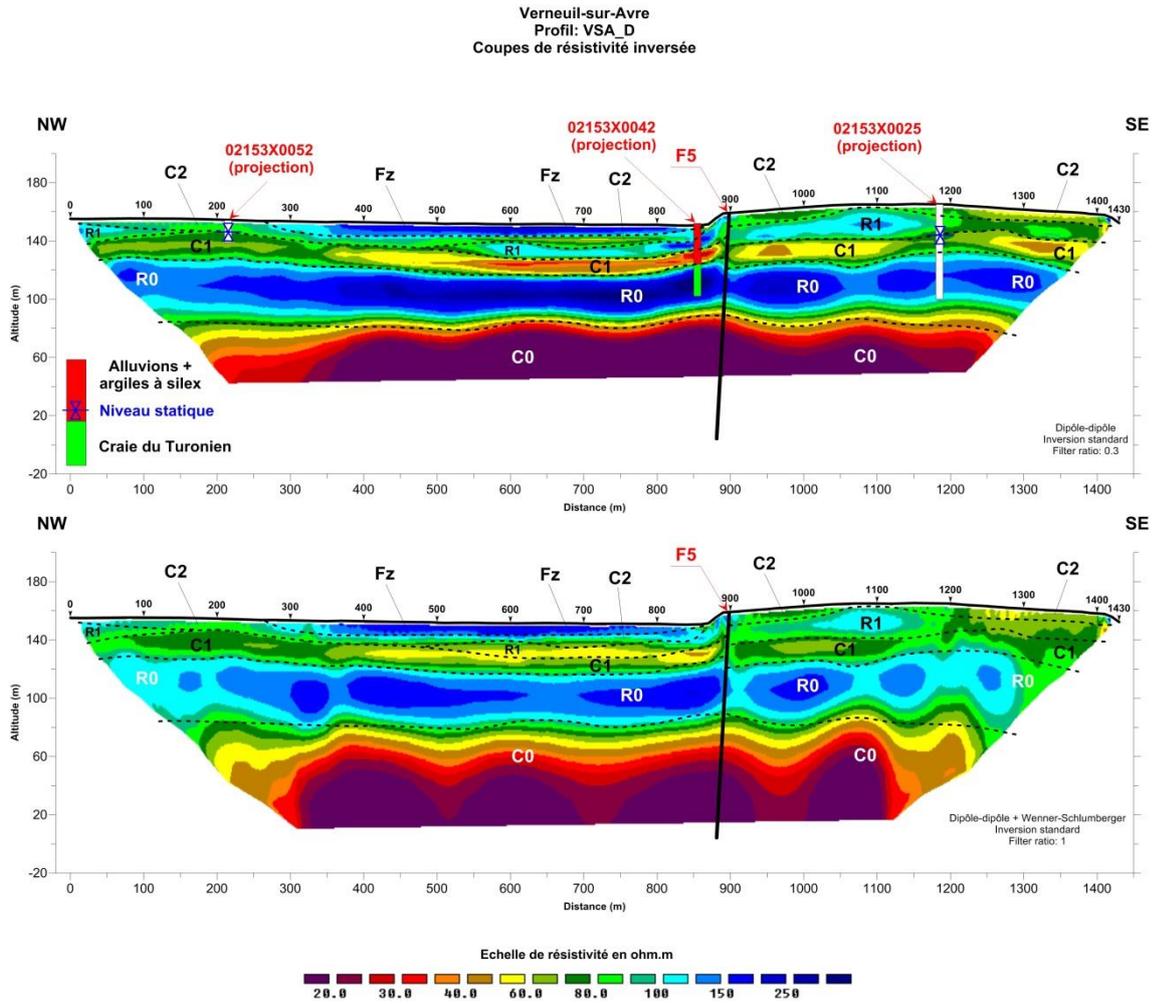
Les chiffres 1, 2 identifient des horizons différents et/ou sont en relation, si possible, avec la notion de superposition de différents terrains (0 étant le terrain le plus profond).

- la représentation des forages projetés sur les coupes de résistivité est la suivante :
  - en bleu, les alluvions,
  - en rouge, les argiles à silex (RS),
  - en vert, la craie du Turonien,
  - en orange, la craie du Cénomaniens,
  - le trait bleu représente le niveau d'eau.



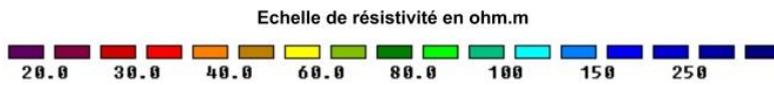
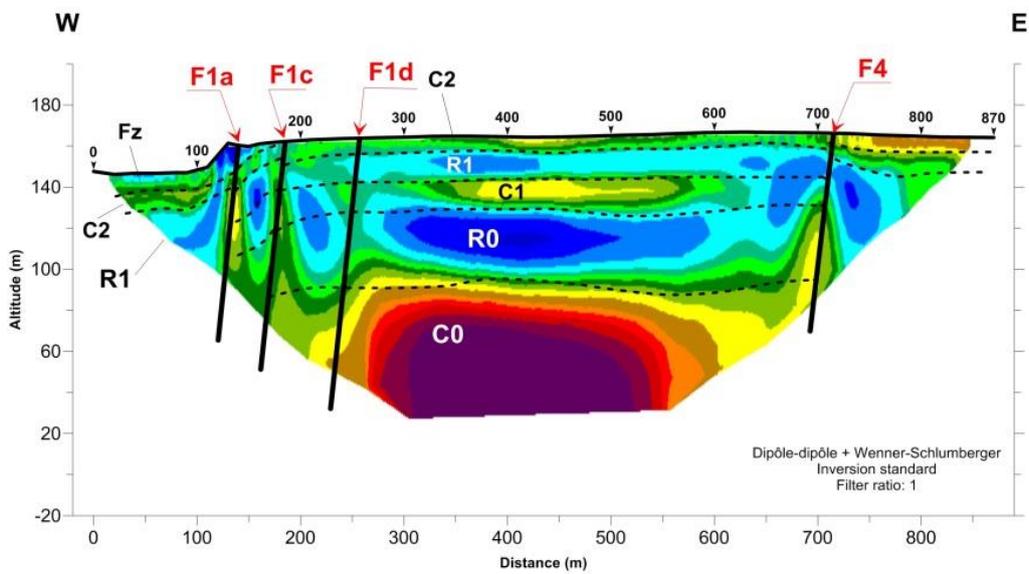
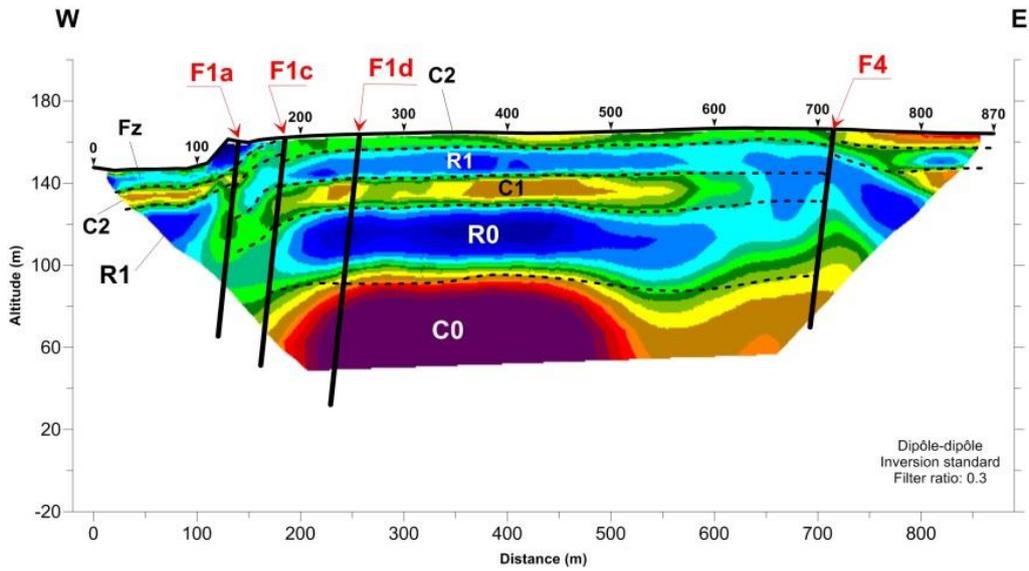
Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre - Phases 3 et 4a



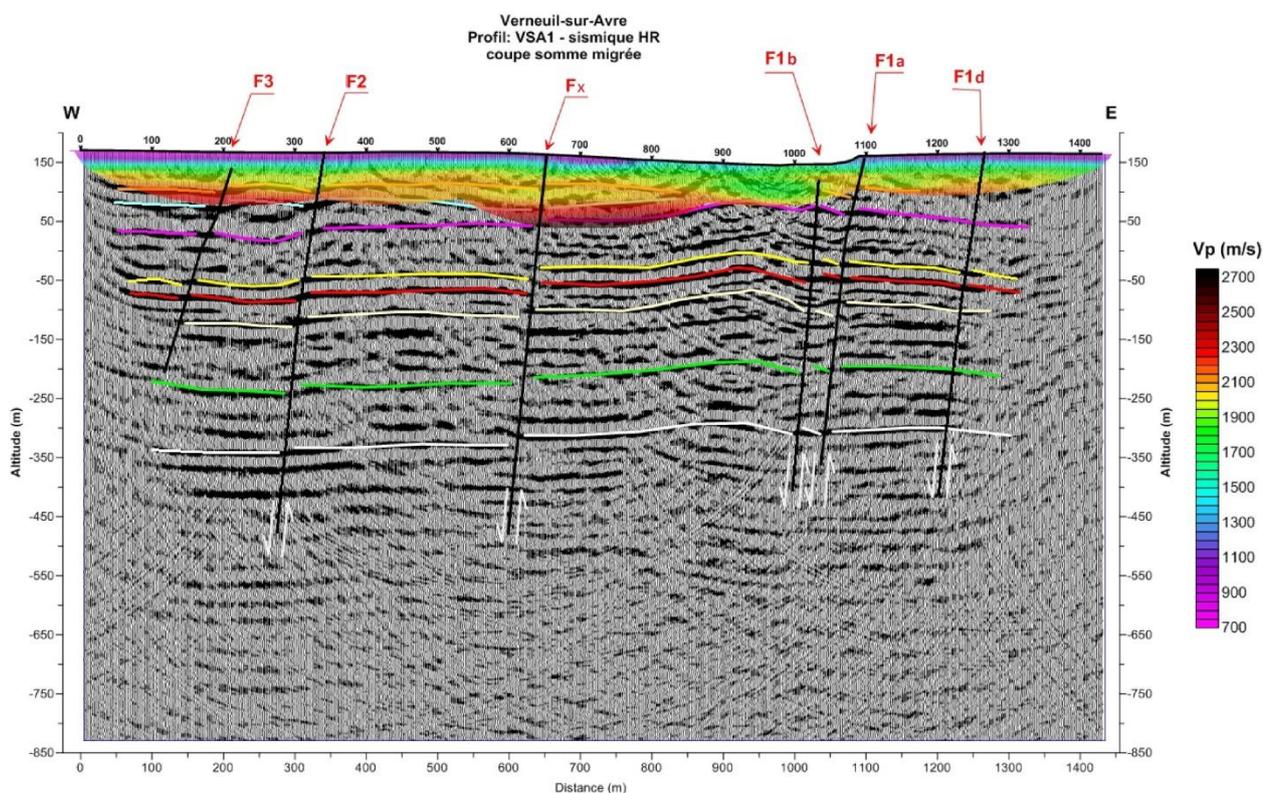
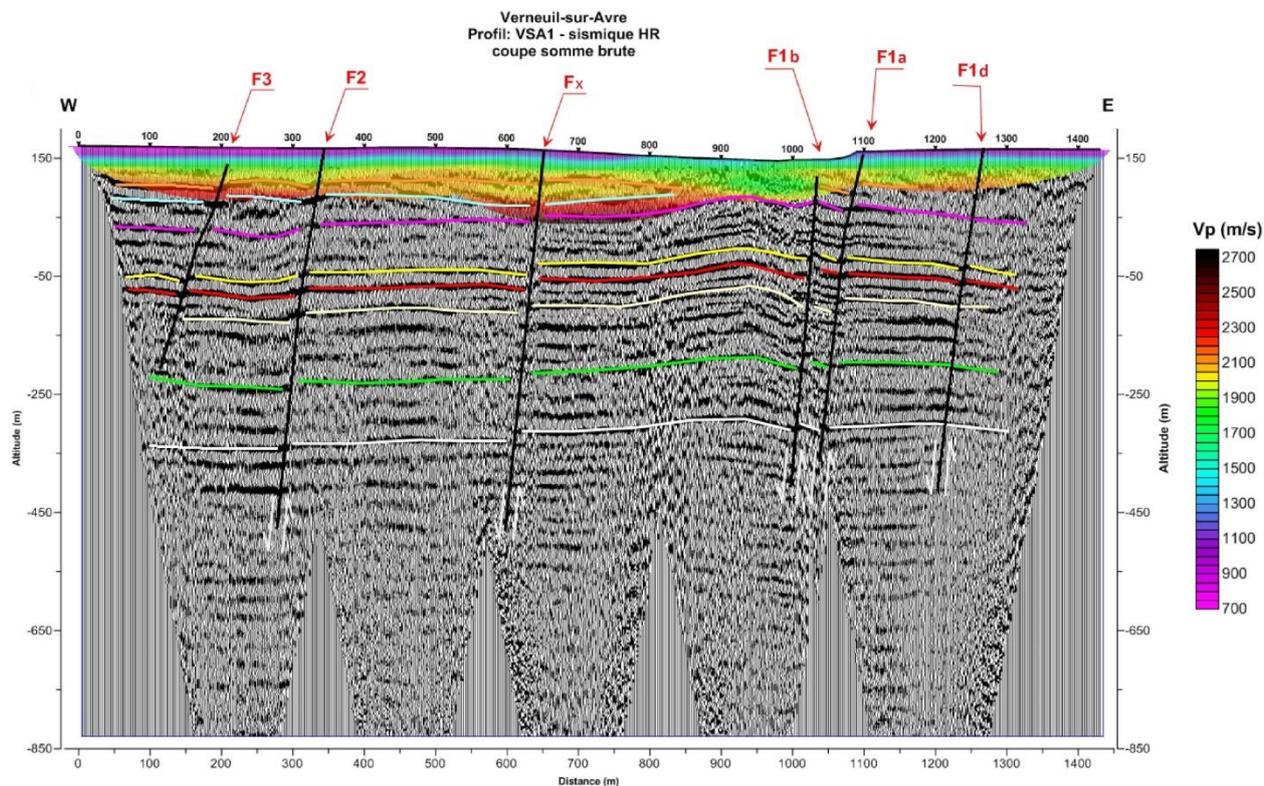




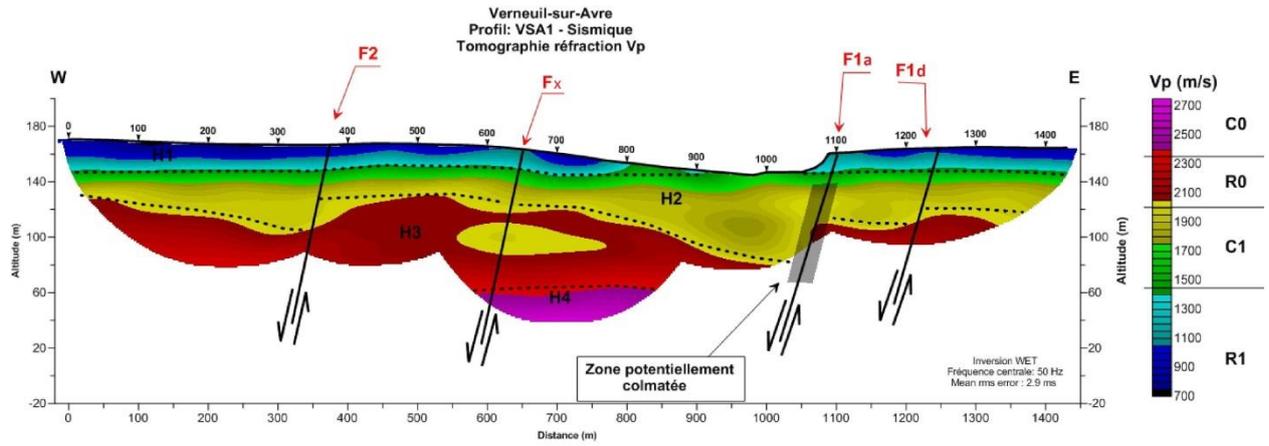
Verneuil-sur-Avre  
 Profil: VSA\_F  
 Coupes de résistivité inversée



Profil A en sismique Haute-Résolution :



Profil A en sismique Tomographie :





## **Annexe 6**

-

### **Principe du panneau électrique**



La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité  $I$  entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$  induite entre une autre paire d'électrodes M et N (figure 1).

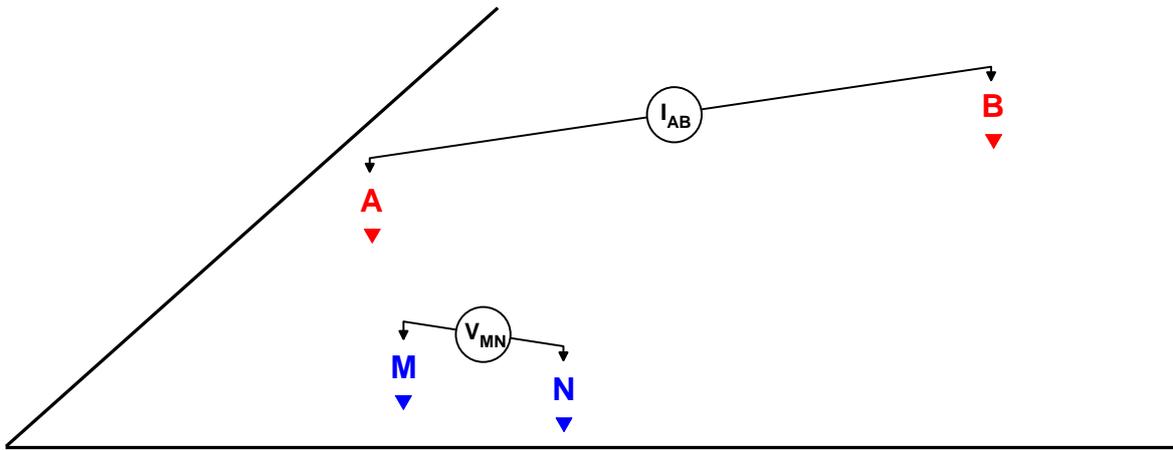


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté  $I$ , de la mesure de la différence de potentiel  $\Delta V$  et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où  $K$  est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (figure 2) :

$$K = 2\pi \times \left[ \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

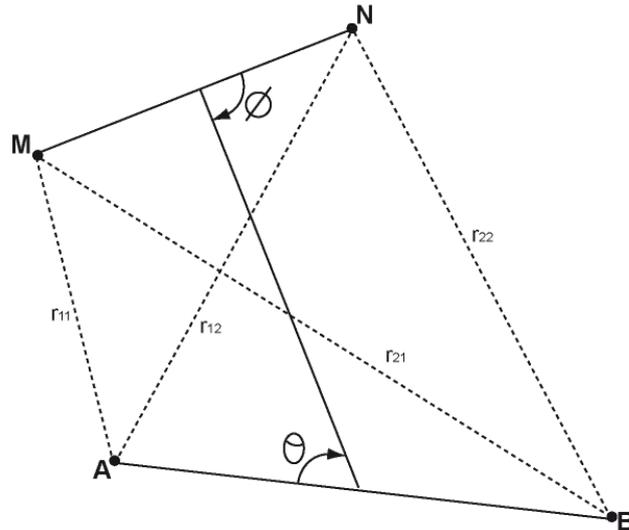


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ( $0 < \theta, \Phi < \pi$ )

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure  $\Delta V$ . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

### Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de  $\Delta V$  pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

**Le dispositif dipôle-dipôle** donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (figure 3).

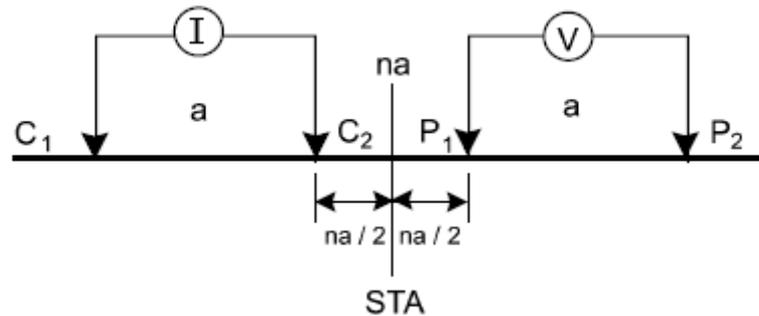


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle

**Le dispositif Schlumberger** est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (figure 4).

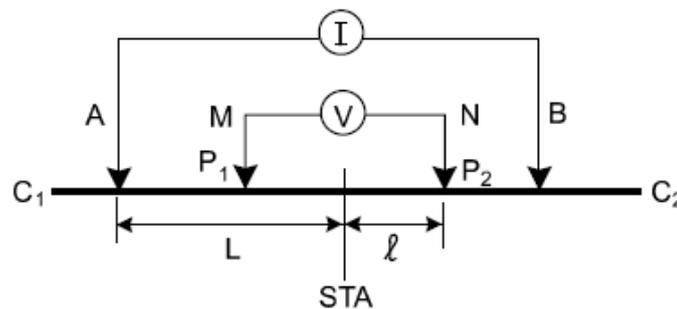


Figure 4 : Configuration de Schlumberger

**Le dispositif Wenner** est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (figure 5).

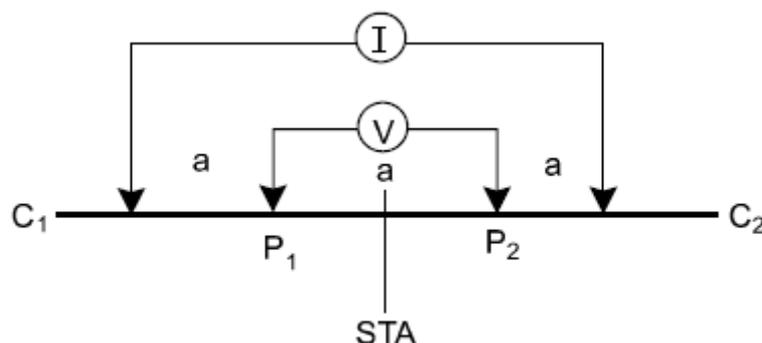


Figure 5 : Configuration de Wenner

### Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (figure 6).

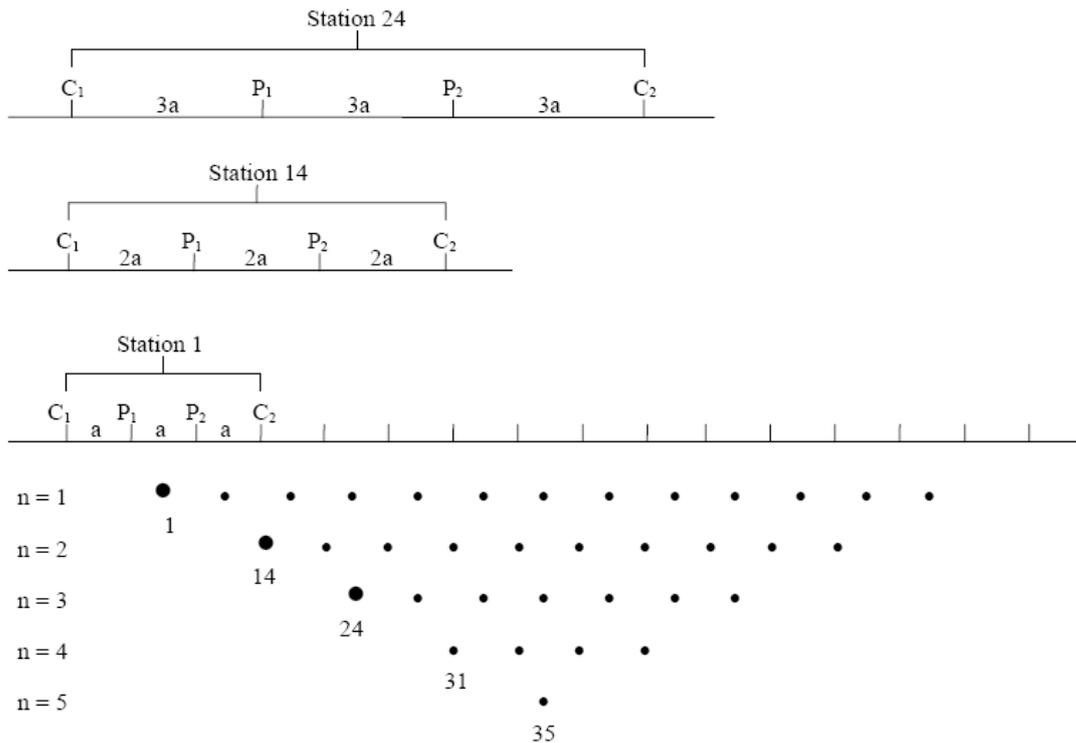


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

### Traitement et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (figure 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (figure 8).

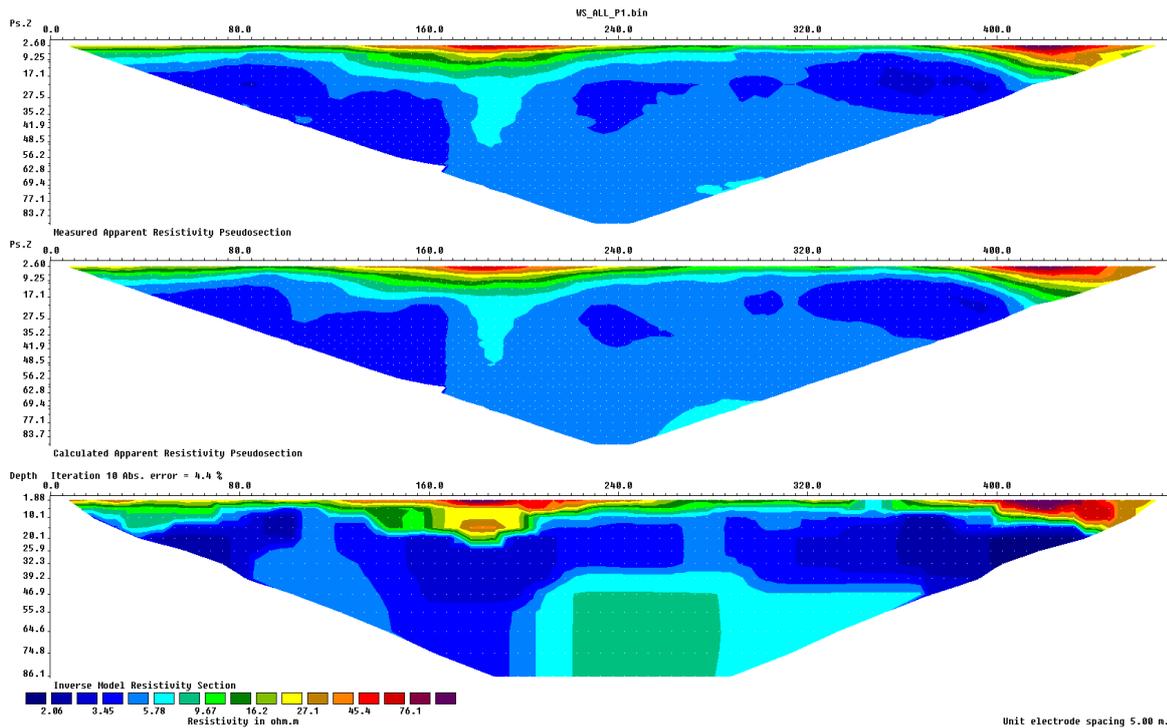


Figure 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurée. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La coupe de résistivité « vraie » (illustration du bas de la figure 7), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

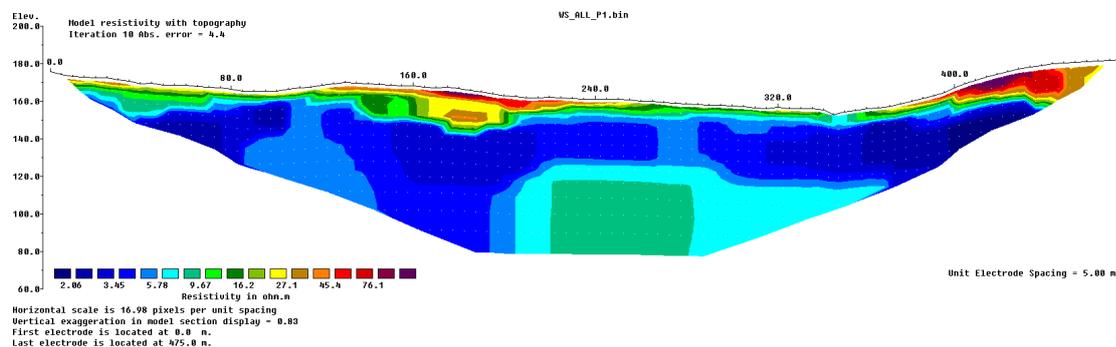


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

## **Applications**

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- Hydrogéologie (épaisseur d'aquifère), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Haute-Normandie**

Parc de la Vatine  
14 route d'Houpeville

76130 – Mont Saint Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00