

Commune de Bavois

**PUITS DES PLANCHES DE L'ISLE
ETUDE DE VULNERABILITE VIS-A-VIS DES
INTRANTS AGRICOLES AZOTES**

**Rapport géophysique
électromagnétique EM-31**

Rapport n° 482-RA-02

2 février 2023

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
2	MODALITES DE LA CAMPAGNE D'INVESTIGATION ELECTROMAGNETIQUE	1
2.1	DISPOSITIF D'INVESTIGATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	1
2.2	MODALITES D'EXPLORATION GEOPHYSIQUE	2
2.3	TRAITEMENT DES DONNEES ET REPRESENTATION	2
3	INTERPRETATION	3
3.1	PRINCIPES GENERAUX DE L'INTERPRETATION	3
3.2	UNITES SEDIMENTAIRES	3
3.3	HYDRODYNAMIQUE SOUTERRAINE	4
4	VULNERABILITE DE L'AQUIFERE	5
5	CONCLUSION	7

1 INTRODUCTION

Le puits des Planches de l'Isle à Bavois connaît depuis plusieurs années des pollutions aux nitrates qui affectent son exploitation. Les études hydrogéologiques réalisées à ce sujet ont montré que l'exploitation agricole des parcelles de la plaine de l'Orbe peut être tenue pour responsable de la majeure partie des intrants en nitrates. Une partie mineure est issue de la minéralisation des tourbes en raison du drainage de la plaine de l'Orbe¹.

La mise en œuvre de solutions agricoles de protection de l'aquifère, au sein des aires Zu d'alimentation du puits des Planches de l'Isle, n'a à ce jour pas permis de résorber efficacement le problème. Il apparaît en outre que ces mesures de protection, qui incluent le plus souvent de favoriser la culture de prairie, ne sont pas applicables dans le contexte particulier de la plaine de l'Orbe dans laquelle est implanté le puits des Planches de l'Isle.

Afin de cibler les mesures agricoles dans une limite acceptable avec l'exploitation agricole des parcelles concernées, il convient de préciser la vulnérabilité de l'aquifère. Ce dernier est en effet localement protégé par des matériaux aquitards tourbeux à limoneux qui limitent la circulation des eaux de surface en profondeur et favorisent les processus de dénitrification. Ce faisant, l'aquitard tourbeux constitue une importante protection de l'aquifère et il est probable que les intrants en nitrates les plus massifs sont le fait de secteurs localisés où la puissance de l'aquitard tourbeux est amoindrie.

Sur la base de ce constat, la commune de Bavois a mandaté le bureau Impact-Concept SA pour une étude géophysique visant à caractériser l'aquitard tourbeux. Les résultats de cette étude sont présentés dans le présent rapport.

2 MODALITES DE LA CAMPAGNE D'INVESTIGATION ELECTROMAGNETIQUE

2.1 Dispositif d'investigation et principe de fonctionnement

Les investigations géophysiques ont été effectuées par induction électromagnétique au moyen du dispositif de mesure EM-31-MK2 (©Geonics). Ce dispositif mesure :

- La conductivité électrique moyenne du sol selon la profondeur d'investigation. Cette valeur moyenne, ne répond pas nécessairement à une relation linéaire, en particulier en cas d'objets métalliques enfouis.
- L'induction électromagnétique qui est associée à la présence d'objets métalliques ou de courants électromagnétiques au sein de la zone d'étude. Dans ce cas précis, la mesure de l'induction électromagnétique met en évidence les perturbations majeures du signal et constitue donc un indice de la qualité de la donnée.

¹ Voir en à ce sujet l'étude de Piller Quentin, *Identification de la source du nitrate grâce aux analyses isotopiques du $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$: étude appliquée à six communes vaudoises*, travail de Master Unil, août 2015 et les rapports Impact-Concept n°482-RA-01 du 21 juin 2013 et 482-LE-10 du 18 octobre 2022

La profondeur d'investigation est de l'ordre de 6 m de profondeur sous la surface. La valeur de conductivité électrique mesurée est dès lors associée à la moyenne des conductivités électriques mesurées sur 6 m environ de profondeur. Sur le site de Bavois, cette mesure est donc directement proportionnelle à l'épaisseur de l'aquitard. Plus ce dernier est épais, plus la conductivité électrique est élevée.

2.2 Modalités d'exploration géophysique

En fonction du contexte hydrogéologique détaillé en introduction, la zone d'investigation a été limitée aux parcelles situées tant dans l'Aire Z_U d'alimentation du puits des Planches de l'Isle que dans la plaine de l'Orbe.

Les parcelles ont été investiguées selon des profils parallèles distants d'environ 20 m (annexe 482-1) orientés selon le sens des cultures, de sorte à garantir la régularité des profils et de limiter l'impact potentiel sur les cultures (piétinement). Des profils perpendiculaires ont cependant été réalisés sur certains secteurs proches du puits de sorte à mieux mettre en évidence des structures d'orientation perpendiculaire au sens des cultures sur les secteurs jugés plus sensibles.

La résolution de mesure le long d'un profil est de 1 mesure/s, soit environ 1 mesure par mètre. Les mesures sont localisées par GPS permettant une précision de l'ordre de 1 à 3 m.

2.3 Qualité des données et traitement

Les mesures ponctuelles ont été interpolées selon la méthode statistique du voisin naturel qui permet de limiter le biais statistique. Cette méthode est jugée pertinente en raison de la haute densité des mesures comme de la régularité des points de mesure.

L'interpolation des mesures d'induction électromagnétique montre une faible perturbation globale du signal, témoin d'une bonne qualité de mesure, exception faite de :

- les voies ferrées induisent une perturbation négative, jusque sur une distance de l'ordre de 40 m de la voie,
- le puits et les conduites situées à proximité induisent une perturbation qui a soigneusement été évitée lors de l'acquisition,
- un objet métallique enfoui (conduite) est présent à une cinquantaine de mètres de la route Bavois-Orny, au lieu-dit les Coussons.

Remarquons que les nombreux drainages de la plaine de l'Orbe ne péjorent pas la qualité du signal.

L'interpolation des mesures de conductivité électrique (exprimées en Ohm m, unité de résistivité électrique correspondant à l'inverse de la conductivité électrique) a été réalisée après suppression des extrema associés aux anomalies détectées par induction électromagnétique, à l'exception de celles issues des voies ferrées (dont l'impact est moindre).

3 INTERPRETATION

3.1 Principes généraux de l'interprétation

Les valeurs de résistivité apparente mesurées sont directement dépendantes de la nature des sols et plus particulièrement de leur capacité à minéraliser les eaux qu'ils contiennent.

Les tourbes et les matériaux à dominance argileuses qui contiennent des eaux fortement minéralisées présentent les résistivités les plus faibles. Ils apparaissent en différents tons de bleu sur les cartes de résistivité apparente.

Les matériaux sableux ou graveleux, qui présentent une porosité efficace importante sont au contraire les plus résistifs et figurent en différents tons de rouge. Un substrat rocheux calcaire ou gréseux sera lui aussi résistif.

Les valeurs intermédiaires (en différents tons de vert ou de jaune) sont tantôt le signe de matériaux mélangés (par exemple des sables limoneux), tantôt d'une superposition d'un matériau résistif (sable) avec un matériau conducteur (argile ou tourbe).

3.2 Unités sédimentaires

Le résultat des mesures est présenté dans les annexes 481-1 (Induction électromagnétique et densité de mesures) et 482-2 (résistivité électrique). L'annexe 482-3 présente l'interprétation hydrogéologique des mesures dont les différentes unités résistives sont détaillées ci-après.

Le cône d'alluvions du Verdet (a), composé d'épandages de sables limoneux peu graveleux sur plus de 15 m de profondeur (forage Pz14) constitue la principale anomalie résistive. Les résistivités apparentes y ont été mesurées à plus de 50 Ohm m. La limite ouest de cette formation, relativement diffuse sur la carte des résistivités (à l'ouest), montre une transition progressive vers les matériaux limoneux et tourbeux de la plaine de l'Orbe.

Les chenaux alluvionnaires (b), qui présentent des résistivités comprises entre 40 et 50 Ohm m, sont dominés par des sables limoneux et des épaisseurs réduites de tourbe (moins de deux mètres dans Pz16). Deux chenaux, prenant naissance dans le cône d'alluvions du Verdet et se développant en direction du nord-est sont ainsi distinctement visibles. D'un point de vue hydrogéologique, ils doivent être interprétés comme des secteurs d'affaiblissement de l'aquitard tourbeux.

La butte des clos (c), qui présente des résistivités apparentes localement élevées (plus de 60 Ohm m) est probablement issue d'une remontée du fond molassique chattien² provoquant un relief souterrain allongé d'orientation nord-sud. Une remontée du fond molassique est en effet observée aux Pz15 et 17, en prolongement de ce relief. Aussi, le caractère tranché des

² La résistivité élevée peut être le signe d'un banc de calcaires lacustres, hypothèse soutenue par les teneurs spécifiquement élevées en sulfates mesurées aux Pz13 et 15

transitions de résistivités est davantage compatible avec une émergence du fond morainique qu'un épandage localisé de sables.

La butte de l'Island (d), topographiquement plus marquée que la précédente, présente des résistivités moindres (40 à 45 Ohm m) qui s'expliquent vraisemblablement par la dominance de matériaux morainiques argileux (faiblement résistifs).

Une ancienne décharge (e) apparaît nettement à l'extrémité de la butte du clos en raison de fortes variations des valeurs de résistivité, comme des anomalies de l'induction électromagnétique.

En dehors de ces unités sédimentaires, apparaissent en bleu les principales zones d'accumulation tourbeuses.

3.3 Hydrodynamique souterraine

Rappelons que l'aquifère du puits des Planches de l'Isle dépend de trois unités principales, à savoir de haut en bas :

- **L'aquitard**, composé d'argiles limoneuses et de tourbes, d'une épaisseur comprise entre 0 et 6 m de profondeur, qui agit comme une protection de l'aquifère, puisque les eaux de surface ne peuvent s'y infiltrer que très lentement et y subissent des processus de dénitrification améliorant leur qualité.
- **L'aquifère**, est dominé dans sa partie supérieure (jusqu'à 7 m environ de profondeur) par des matériaux sableux, qui laissent place en profondeur à des chenaux graveleux supportant l'essentiel des circulations d'eau souterraines.
- **L'aquiclude**, matériau imperméable alternativement morainique et molassique, qui forme la base de l'aquifère, compris entre 10 et 15 m de profondeur.

L'investigation géophysique par électromagnétique détaille les 6 premiers mètres de profondeur, soit essentiellement la nature de l'aquitard, permettant de mettre en valeur les éléments suivants :

- Le cône du Verdet (a) se distingue par l'absence d'aquitard et est dès lors caractérisé par une infiltration accélérée.
- Les deux chenaux alluvionnaires mis en évidence (b) constituent des zones d'affaiblissement localisé de l'aquitard.
- Les buttes du clos (c) et de l'Island (d) constituent des points d'émergence partielle de l'aquiclude. Cela signifie qu'une partie des eaux rejoint la nappe par ruissellement souterrain. Il est difficile de dire dans quelle mesure ce processus favorise la pénétration directe des eaux dans l'aquifère. Les teneurs en nitrates relativement élevées qui avaient été mesurées dans le Pz13 pourraient confirmer cette hypothèse.

Outre la nature de l'aquitard, les données géophysiques apportent un complément d'information relatif à la circulation des eaux au sein de l'aquifère. En effet, les buttes du Clos et de l'Island constituent la bordure d'un sillon graveleux qui contraint une large partie

des eaux à s'écouler en direction du nord et du puits des Planches de l'Isle. Les forages réalisés montrent que les matériaux graveleux les plus perméables se situent à plus de 6 m de profondeur. Or les mesures électromagnétiques (limitées à 6 m de profondeur) démontrent que les remontées du fond molassique/morainique sont supérieures à cette cote. En conséquence les reliefs des buttes des Clos et de l'Isle devraient dès lors engendrer un réel effet de barrage à l'échelle de l'aquifère et contraindre une part importante des écoulements à rejoindre le sillon graveleux. D'un point de vue plus concret, cela signifie que la part des eaux présentant une probabilité d'écoulement inférieure à 10 % telle que délimitée dans le rapport de délimitation de l'aire Z_U est potentiellement inférieure à celle alors supposée.

4 VULNERABILITE DE L'AQUIFERE

La vulnérabilité de l'aquifère face à des intrants en nitrates dépend de deux facteurs principaux :

- **La perméabilité des horizons sédimentaires de surface** est directement corrélée avec la vulnérabilité de l'aquifère. Un matériel peu perméable limite le lessivage, ce qui favorise l'absorption des nitrates par les plantes ou leur évacuation par drainage. C'est ce paramètre qui est cartographié à partir des données électromagnétiques.

Remarquons cependant que l'essentiel des surfaces peu perméables sont de nature tourbeuse et dès lors sensibles à des processus de minéralisation à l'origine de relargage de nitrates. Les études précédentes ont montré que ces processus sont à l'origine de concentrations en nitrates dans les eaux souterraines comprises entre 10 et 20 mg/l. Toutefois, le drainage à l'origine de ce processus constitue également un important facteur d'exportation des nitrates qui sont dès lors évacués dans les eaux de surface ce qui limite probablement l'effet négatif associé à la minéralisation des tourbes.

- **Le facteur de dilution** est proportionnel à la distance au puits des Planches de l'Isle. Une parcelle éloignée du puits voit ses concentrations en nitrates fortement diluées. Des intrants en nitrates ponctuels, mais massifs, à proximité immédiate du puits se comporteront au contraire comme un panache de pollution engendrant un fort impact au puits.

Sur la base de ces principes généraux, les différentes unités sédimentaires évoquées au chapitre 3.2 peuvent être associées à trois classes de vulnérabilités détaillées en annexe 482-4 :

Le cône d'alluvions du Verdet (a) présente une vulnérabilité élevée à moyenne en raison de l'absence de l'aquitard, comme d'une relative proximité du puits. La surface étendue de cette formation engendre un potentiel de pollution aux nitrates relativement important (moindre effet de dilution pour une même sensibilité).

Le secteur des côtes de Bavois (f), à l'est de la zone d'investigation géophysique, ne diffère d'un point de vue géologique que peu du cône d'alluvions du Verdet puisqu'il est pareillement dominé par des épandages de sables perméables en surface. La vulnérabilité de l'aquifère doit cependant y être considérée comme moindre en raison d'un important facteur de dilution qui dépend ici plus des faibles volumes d'eau relatifs (ruissellement de surface plus important et une faible tranche d'eau proportionnellement à l'aquifère de la plaine de l'Orbe) que de la distance au puits (minimisée par un effet de chenal). Cette analyse se voit confirmée par les faibles teneurs en nitrates mesurées au Pz14 depuis la résolution de la pollution, légitimant une vulnérabilité moyenne.

Les chenaux alluvionnaires (b) associent un affaiblissement de l'aquitard avec une relative proximité du puits des Planches de l'Isle, légitimant une vulnérabilité élevée à moyenne, similaire à celle du cône d'alluvions du Verdet. Si le volume total de nitrates susceptibles d'être lessivé y est assurément moindre, l'impact d'une pollution concentrée y est élevé comme tendrait à le confirmer les hautes teneurs en nitrates mesurées en septembre 2022 (112 mg/l)³.

La butte du Clos (c), considérée comme une émergence du substrat molassique, ne constitue pas à proprement parler une zone d'infiltration préférentielle dans l'aquifère. Les eaux qui s'y infiltrent rejoignent vraisemblablement l'aquifère par ruissellement souterrain. Il est cependant difficile de préciser dans quelle mesure ces eaux transitent au travers de l'aquitard tourbeux (auquel cas leur impact serait moindre) ou s'infiltrent rapidement dans l'aquifère (auquel cas leur impact serait significatif). La surface vulnérable réelle est limitée puisque seule une moitié seulement de ce relief s'écoule vraisemblablement par ruissellement souterrain en direction de l'est et du puits. Seule la moitié est de ce relief est donc classée en vulnérabilité moyenne.

Précisions enfin que ces classes de vulnérabilité ne remettent pas en question la délimitation des aires d'alimentation Zu, les secteurs présentant une faible vulnérabilité ne contribuent en effet pas moins à l'alimentation du puits, mais présentent des conditions propices à une meilleure absorption des nitrates ou à leur évacuation hors du bassin d'alimentation.

³ Les concentrations en nitrates dans l'aquifère, mesurées au cours des diverses campagnes d'analyse effectuées par le passé sont rappelées en annexe 482-5.

5 CONCLUSION

Le bassin d'alimentation du puits des Planches de l'Isle a fait l'objet d'une investigation géophysique au moyen de l'EM-31, méthode d'investigation électromagnétique qui mesure la conductivité électrique apparente du sol comme une moyenne des profondeurs comprises entre 0 et 6 m sous la surface.

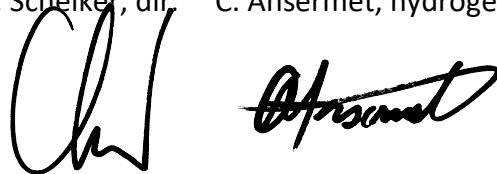
Cette méthode a permis d'identifier les principales unités sédimentaires affleurant sur la partie inférieure du bassin d'alimentation du puits des Planches de l'Isle et plus particulièrement de cartographier l'extension de l'aquitard tourbeux. Cette formation agit en effet comme une protection vis-à-vis des intrants en nitrates d'origine agricole.

Cette étape a permis de spécifier la vulnérabilité indicative du bassin d'alimentation du puits des Planches de l'Isle vis-à-vis des intrants agricoles. Cette carte ne remplace pas la délimitation de l'aire d'alimentation Zu et les mesures agricoles qui y seraient préconisées, mais permet d'identifier les secteurs les plus susceptibles de provoquer un panache de pollution dommageable pour la mise en service du puits. En ce sens, elle constitue un outil utile pour cibler au mieux les parcelles sur lesquelles des mesures agricoles de protection devraient être prises en priorité et exclure les parcelles où l'utilité de telles mesures serait moindre.

Les méthodes géophysiques sont des méthodes d'investigation indirectes soumises à interprétation. En dépit de la très bonne cohérence des résultats obtenus sur cette campagne, on ne peut exclure que des hétérogénéités significatives n'aient pas été détectées ou mal interprétées.

Impact-Concept SA

C. Schelker, dir. C. Ansermet, hydrogéologue



Le Mont-sur-Lausanne, le 2 février 2023

N/réf. : 482-RA-02/CA

ANNEXES

N° 482	- 1	Induction électromagnétique
N° 482	- 2	Résistivité électrique apparente
N° 482	- 3	Interprétation géologique
N° 482	- 4	Vulnérabilité indicative de l'aquifère face aux
N° 482	- 5	Résistivité électrique apparente

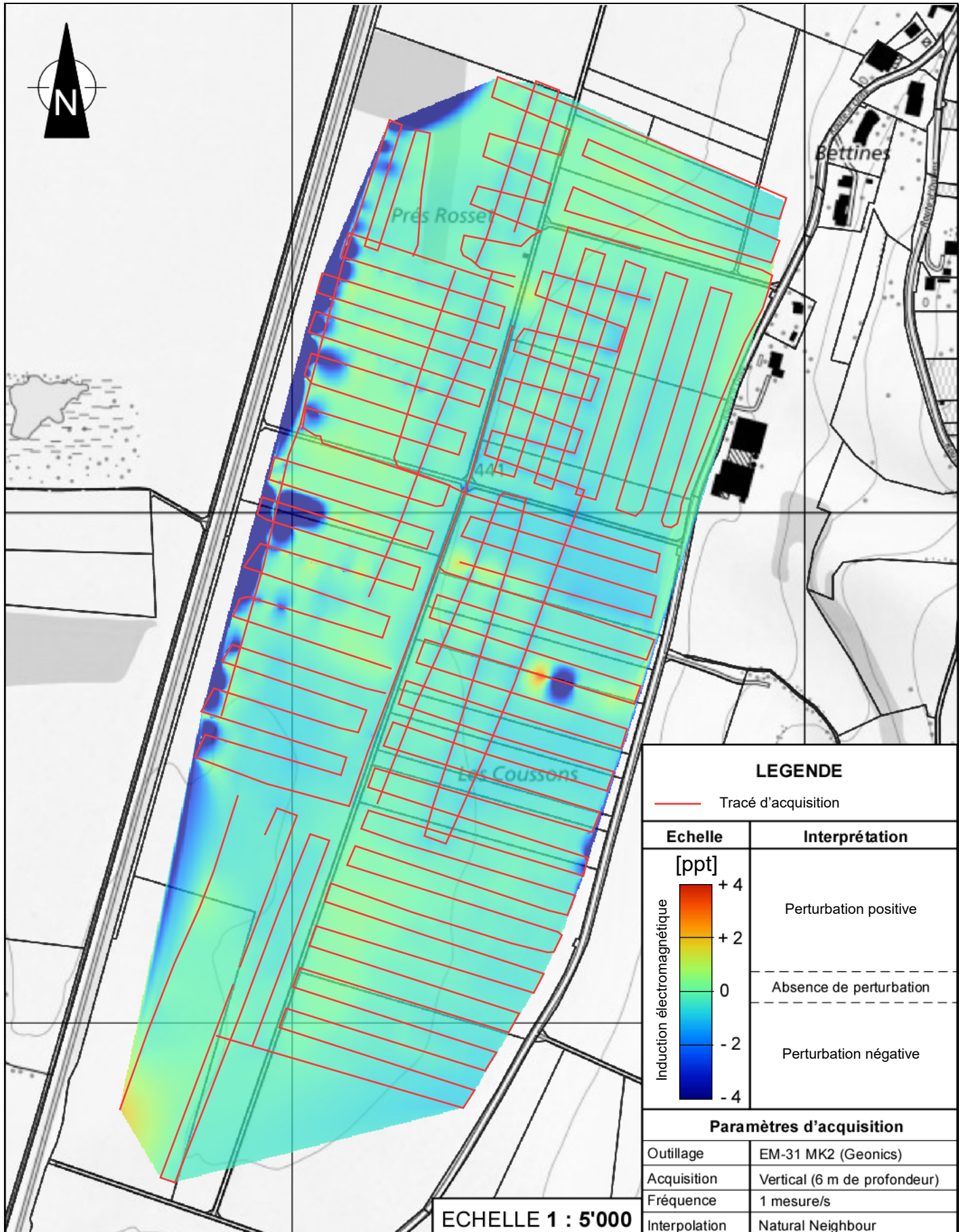
2'532'500

2'533'000



1'170'000

1'169'500

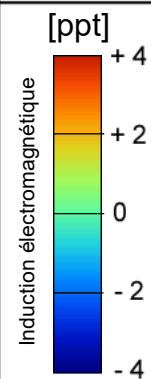


LEGENDE

— Tracé d'acquisition

Echelle

Interprétation



+ 4
Perturbation positive

+ 2
Absence de perturbation

0
Perturbation négative

Paramètres d'acquisition

Outillage	EM-31 MK2 (Geonics)
Acquisition	Vertical (6 m de profondeur)
Fréquence	1 mesure/s
Interpolation	Natural Neighbour

ECHELLE 1 : 5'000

INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

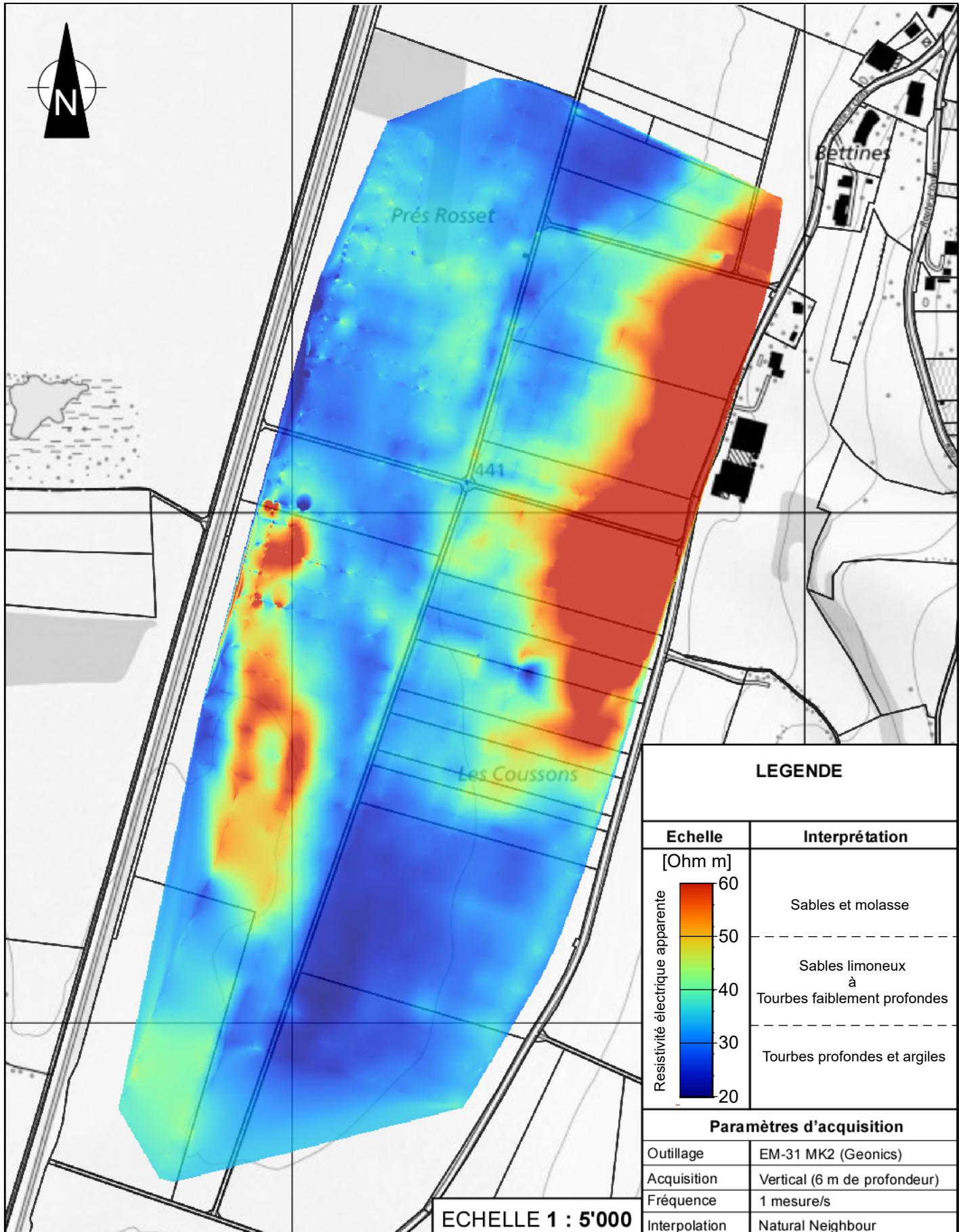
2'532'500

2'533'000



1'170'000

1'169'500



LEGENDE

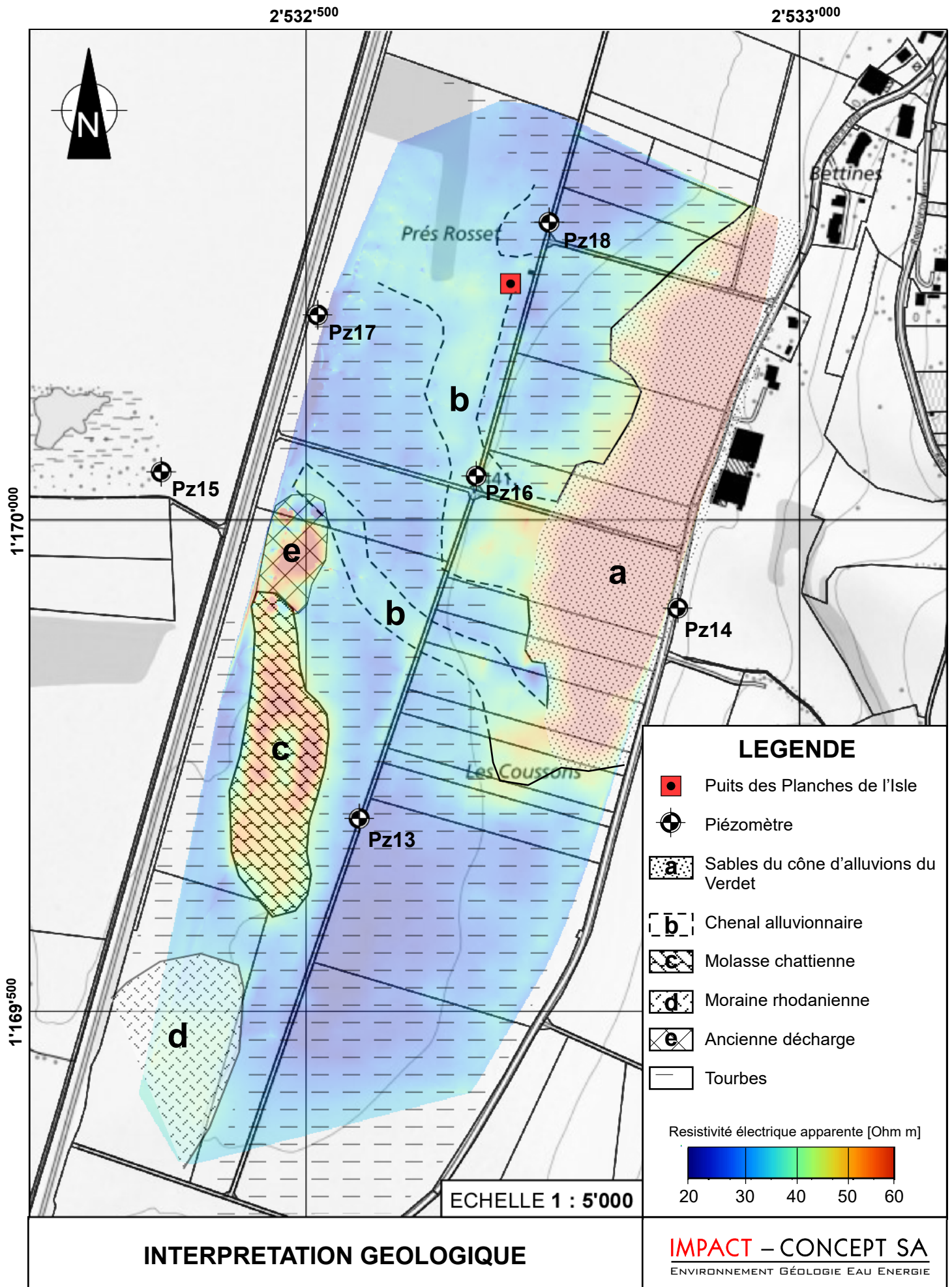
Echelle	Interprétation
[Ohm m]	
60	Sables et molasse
50	Sables limoneux à
40	Tourbes faiblement profondes
30	Tourbes profondes et argiles
20	

Paramètres d'acquisition

Outillage	EM-31 MK2 (Geonics)
Acquisition	Vertical (6 m de profondeur)
Fréquence	1 mesure/s
Interpolation	Natural Neighbour

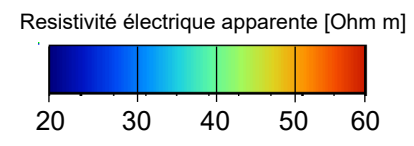
ECHELLE 1 : 5'000

RESISTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE

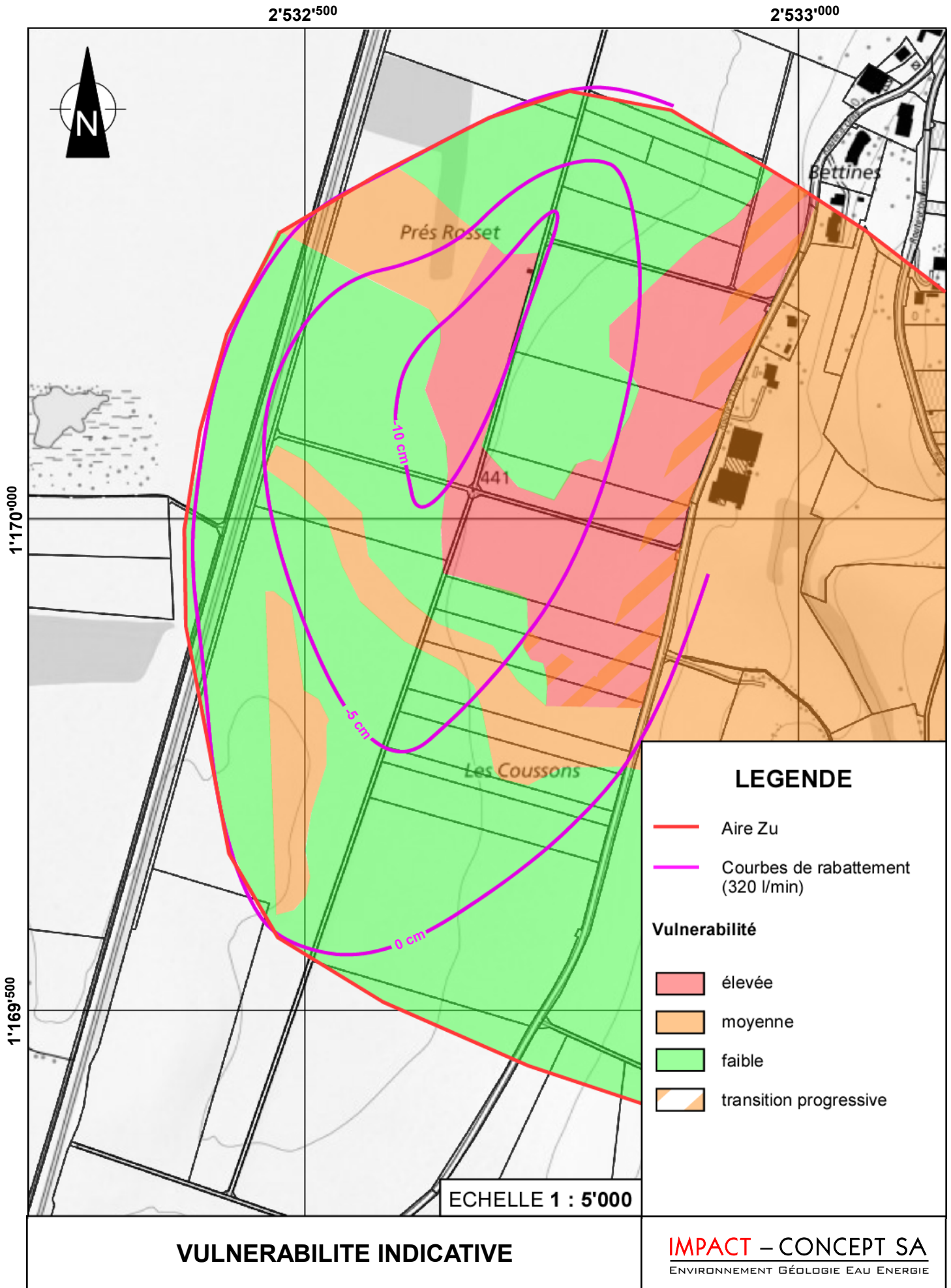


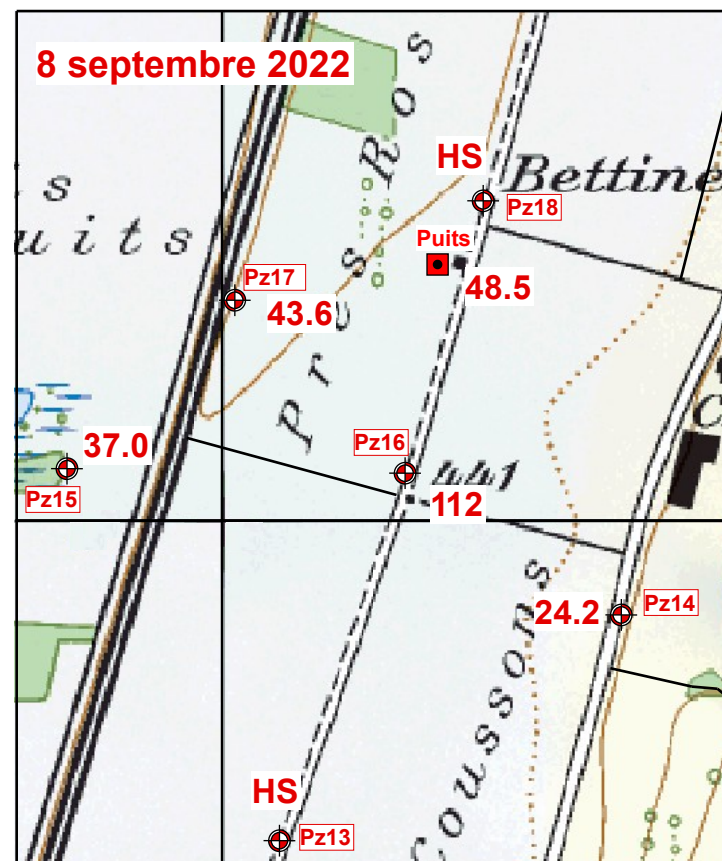
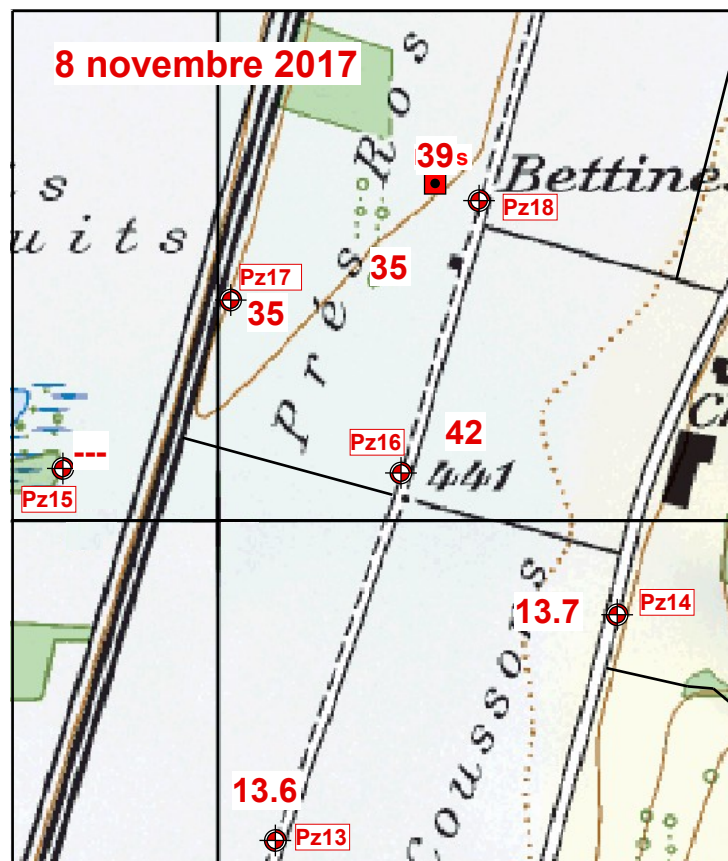
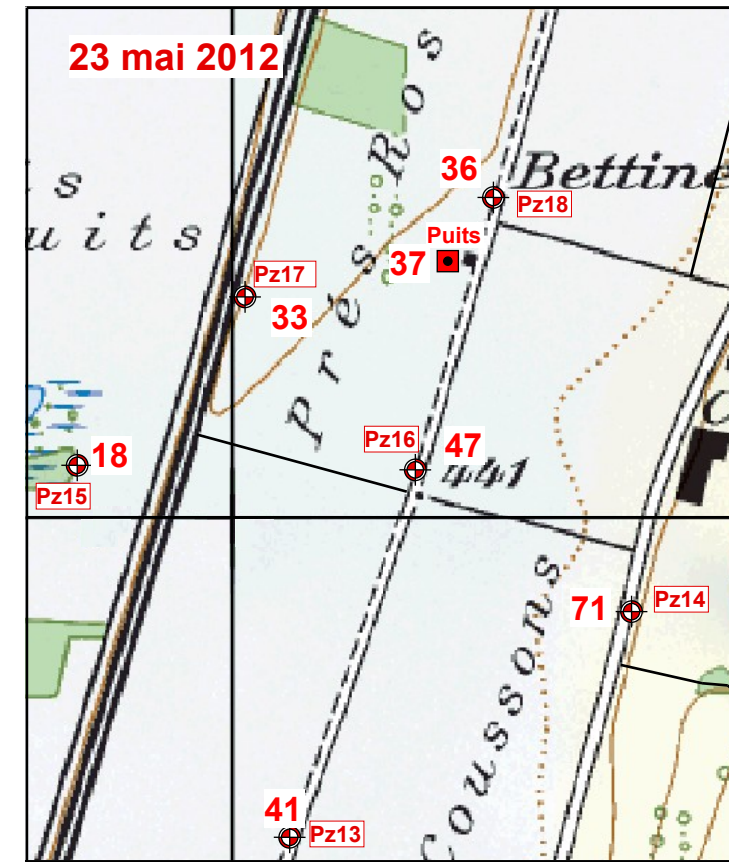
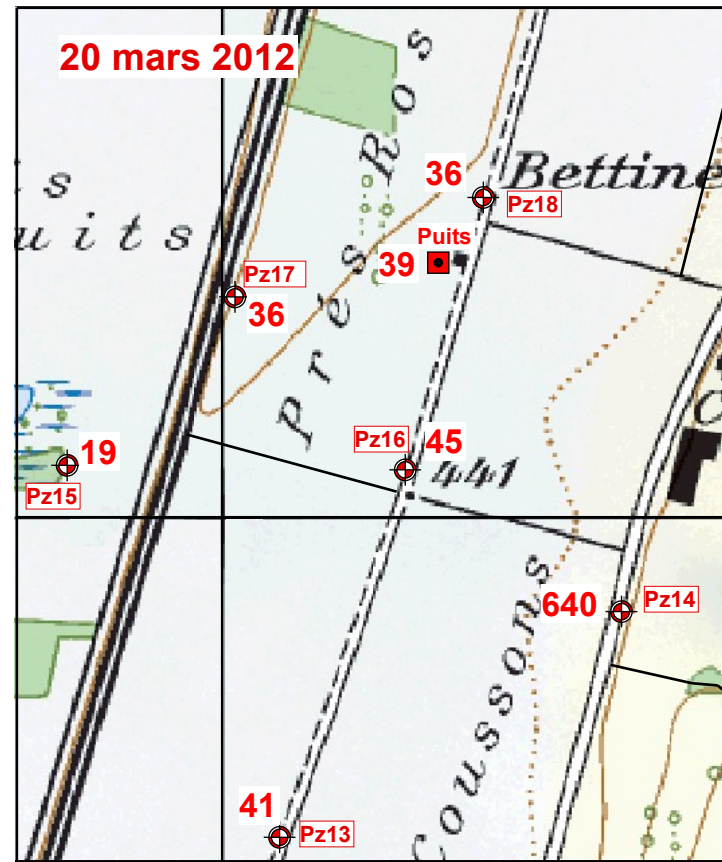
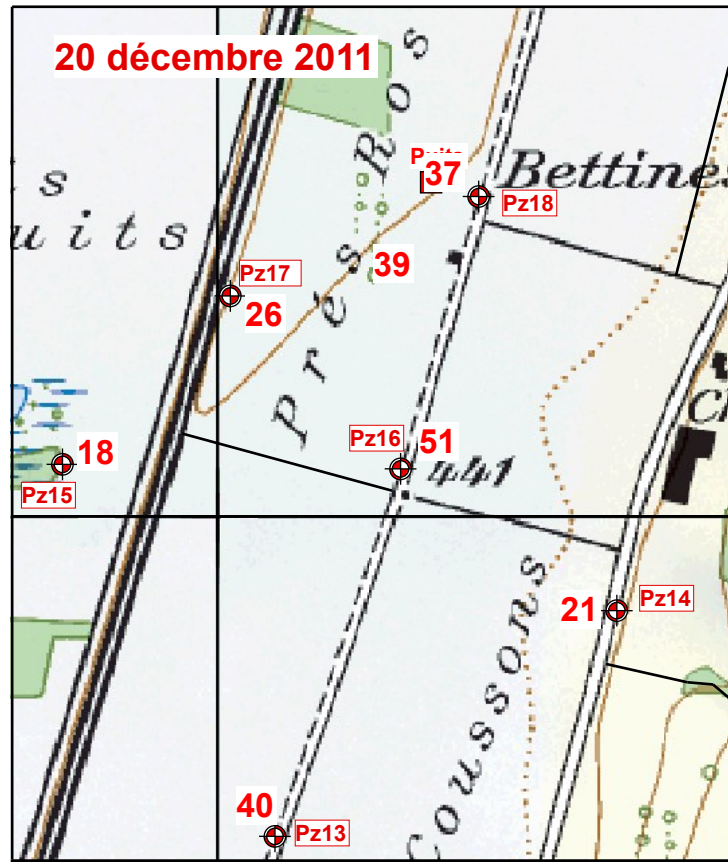
LEGENDE

- Puits des Planches de l'Isle
- Piézomètre
- a Sables du cône d'alluvions du Verdet
- b Chenal alluvionnaire
- c Molasse chattienne
- d Moraine rhodanienne
- e Ancienne décharge
- Tourbes



INTERPRETATION GEOLOGIQUE





Commune de Bavois

Puits des Planches de l'Isle

**SYNTHESE DES CAMPAGNES DE
MESURE DES CONCENTRATIONS
EN NITRATES DANS L'AQUIFERE**

- Puits des Planches de l'Isle
- ⊙ Piézomètre avec précision du nom et de la concentration en nitrates exprimée en mg/l

IMPACT – CONCEPT SA <small>ENVIRONNEMENT GÉOLOGIE EAU ENERGIE</small>	ANNEXE 482-5
---	-------------------------