

Rapport de Détection de Cavités Souterraines

*Déviation Sud-Ouest
d'Evreux (DSOE)*

—

*Bretelle Nord du demi-
échangeur
d'Arnières-sur-Iton (27)*

SAS TELLUS ENVIRONMENT

Centre d'affaires CICEA, 2 rue du courtil 35170 BRUZ | www.tellus-environment.com |

☎ 02 99 52 36 93 | contact@tellus-environment.com

SIRET 752 182 824 00017 | APE 6201Z | 752 182 824 RCS RENNES

INFORMATIONS GÉNÉRALES

<u>Titre</u>	Rapport de Détection de Cavités Souterraines Déviation Sud-Ouest d'Evreux (DSOE) Bretelle Nord du demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton (27)
<u>MOA</u>	 PRÉFET DE LA RÉGION NORMANDIE <i>Liberté Égalité Fraternité</i> DREAL NORMANDIE <i>Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – Normandie</i> Cité Administrative 2 Rue Saint-Sever – 76032 ROUEN CEDEX
<u>AMOA/PYRO</u>	 CESP <i>Cabinet d'Etude en Sécurité Pyrotechnique</i> Le Masters 25 Rue de Châtillon – 25480 ECOLE VALENTIN
<u>AMOA/AMIANTE</u>	 SCOPING concepteur-novateur de la ville de demain. SCOPING – Agence Ile-de-France 15 Avenue Emile Baudot – 91300 MASSY
<u>MOE</u>	 MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE LA DÉCENTRALISATION <i>Liberté Égalité Fraternité</i> DIR NORD-OUEST <i>Direction Interdépartementale des Routes Nord-Ouest</i> 97 Boulevard de l'Europe C.S. 61141 – 76175 ROUEN CEDEX 1
<u>Référence document</u>	20250513_R0
<u>Classification</u>	Confidentiel client
<u>Publication</u>	13/05/2025

SUIVI DES MODIFICATIONS ET MISES À JOUR DU DOCUMENT

<u>Date</u>	<u>Pages</u>	<u>Nature des modifications</u>	<u>Rédacteur</u>	<u>Vérificateur</u>	<u>Approbateur</u>	<u>Révision</u>
13/05/2025	104	Création du document	M. PETRONILLE	G. ETAIX	G. ETAIX	0

CONTACTS

<u>Qualité</u>	<u>Nom</u>	<u>Coordonnées</u>
Géophysicienne – Cheffe de projet	Marie PETRONILLE	07.77.05.79.93 marie.petronille@tellus-environnement.com
CEO	Geoffroy ETAIX	06.66.61.90.88 geoffroy.etaix@tellus-environnement.com



Ce document est strictement confidentiel.

***Sa reproduction, même partielle, ou sa diffusion est INTERDITE
sans l'autorisation écrite préalable de Tellus Environnement***

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ÉTUDE.....	9
2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE	11
2.1. DELIMITATION DE L'EMPRISE ET PRESENTATION DU PROJET D'AMENAGEMENTS.....	11
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	14
2.3. CONTEXTE HISTORIQUE ET PYROTECHNIQUE.....	18
2.4. ENVIRONNEMENT ACTUEL DU SITE ET REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE.....	21
3. PHASAGE DES TRAVAUX	22
4. PHASE 1 : TERRASSEMENT DE BANQUETTES	26
4.1. OBJECTIF ET BESOIN	26
4.2. PRINCIPE DU TERRASSEMENT DE BANQUETTES.....	28
4.3. TERRASSEMENT DE BANQUETTES SUR LE SITE D'ETUDE	29
5. PHASE 2 : MESURES GÉOPHYSIQUES	33
5.1. CHOIX DES METHODES GEOPHYSIQUES ET VALIDATION.....	33
5.2. DESCRIPTION DES METHODES ET PROTOCOLES DE MESURES	33
5.2.1. METHODE MAGNETIQUE	33
5.2.2. METHODE ELECTROMAGNETIQUE « HAUTE FREQUENCE » : LE RADAR	34
5.2.3. METHODE MICROGRAVIMETRIQUE	34
5.3. TRAITEMENTS DES DONNEES	37
5.3.1. PROTOCOLE DE TRAITEMENT DES DONNEES MAGNETIQUES ET METHODE D'INTERPRETATION	37
5.3.2. PROTOCOLE DE TRAITEMENT DES DONNEES RADAR ET METHODE D'INTERPRETATION.....	39
5.3.3. PROTOCOLE DE TRAITEMENT DES DONNEES MICROGRAVIMETRIQUES ET METHODE D'INTERPRETATION.....	41
5.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	42
5.4.1. MESURES MAGNETIQUES.....	42
5.4.2. MESURES RADAR.....	49
5.4.3. MESURES MICROGRAVIMETRIQUES.....	61
6. REPONSES AU BESOIN DU CLIENT	63

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: LOCALISATION DE L'EMPRISE D'ETUDE – PROJET DSOE – DEMI-ECHANGEUR D'ARNIERES-SUR-ITON – BRETELLE DE SORTIE.	12
FIGURE 2 : PLAN DE MASSE DU PROJET DSOE – DEMI-ECHANGEUR D'ARNIERES-SUR-ITON – BRETELLE DE SORTIE.	13
FIGURE 3 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE D'EVREUX AU 1/50000 ^E	15
FIGURE 4 : PLANS DE LA CARRIERE POTIER ETABLIS PAR LE BRGM EN 2004 (A GAUCHE) ET PAR DES SPELEOLOGUES EN 1973 (A DROITE).	16
FIGURE 5 : LOCALISATION DE SONDAGES GEOTECHNIQUES REALISES ENTRE 2012 ET 2023 SUE L'EMPRISE D'ETUDE.	17
FIGURE 6 : PLAN DE LOCALISATION DE LA ZONE DE DECHARGE SUR L'EMPRISE D'ETUDE.	20
FIGURE 7 : SCHEMAS DE LA CREATION DES BANQUETTES.	23
FIGURE 8 : SCHEMA DE LA REALISATION DES MESURES GEOPHYSIQUES EN VUE DE LA DETECTION D'EVENUELLES CAVITES SOUTERRAINES.	24
FIGURE 9 : PLAN DE LOCALISATION DES EMPLACEMENTS PREVISIONNELS APPROXIMATIFS DES BANQUETTES SUR L'EMPRISE D'ETUDE.	27
FIGURE 10 : SCHEMA DU TERRASSEMENT DE BANQUETTES SUR UNE COLLINE.	28
FIGURE 11 : EMPRISE DES BANQUETTES TERRASSEES SUR LE SITE D'ETUDE.	30
FIGURE 12 : TOPOGRAPHIE DU SITE D'ETUDE AVANT ET APRES TERRASSEMENT DES BANQUETTES.	31
FIGURE 13 : LOCALISATION DES INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES AU 24/04/25.	36
FIGURE 14 : PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES MAGNETIQUES PAR TELLUS ENVIRONNEMENT.	38
FIGURE 15 : PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNEES RADAR PAR TELLUS ENVIRONNEMENT.	40
FIGURE 16 : CARTE 2D DU CHAMP MAGNETIQUE TOTAL ET PREMIERE INTERPRETATION EN TERMES DE ZONES SATUREES/OBSTRUCTIONS.	44
FIGURE 17 : CARTE 2D DU GRADIENT MAGNETIQUE VERTICAL ET PREMIERE INTERPRETATION EN TERMES DE ZONES SATUREES/OBSTRUCTIONS.	45
FIGURE 18 : ANOMALIES CALCULEES ET CLASSIFICATION SELON LEUR RISQUE PYROTECHNIQUE POTENTIEL.	46
FIGURE 19 : C-SCAN DE LA BANQUETTE 3 A 80 CM DE PROFONDEUR ET REPERAGE DE ZONES D'INTERET – EXEMPLE DU PROFIL RADAR N°2 A 300 MHZ.	50
FIGURE 20 : C-SCAN DE LA BANQUETTE 3 A 80 CM DE PROFONDEUR ET REPERAGE DE ZONES D'INTERET – EXEMPLE DU PROFIL RADAR N°2 A 70 MHZ.	51
FIGURE 21 : REPERAGE DE ZONES D'INTERET SUR LE PROFIL RADAR N°4 A 300 MHZ.	52
FIGURE 22 : C-SCAN DE LA BANQUETTE 2 A 5 M DE PROFONDEUR ET REPERAGE DE ZONES D'INTERET – EXEMPLE DU PROFIL RADAR N°8 A 300 MHZ.	54
FIGURE 23 : C-SCAN DE LA BANQUETTE 2 A 5 M DE PROFONDEUR ET REPERAGE DE ZONES D'INTERET – EXEMPLE DU PROFIL RADAR N°9 A 300 MHZ.	55
FIGURE 24 : C-SCAN DE LA BANQUETTE 1 A 6 M DE PROFONDEUR ET REPERAGE DE ZONES D'INTERET – EXEMPLE DU PROFIL RADAR N°13 A 300 MHZ.	57
FIGURE 25 : RESULTATS DES MESURES RADAR OBTENUS POUR LA BANQUETTE 0.	59
FIGURE 26 : REPERAGE DE ZONES D'INTERET SUR LES BANQUETTES PROSPECTEES A L'ISSUE DES MESURES RADAR.	60
FIGURE 27 : INTERPRETATION DES RESULTATS ISSUS DES MESURES MICROGRAVIMETRIQUES EFFECTUEES SUR LE SITE D'ETUDE.	62
FIGURE 28 : CONCATENATION DES RESULTATS ISSUS DE L'ENSEMBLE DES MESURES EFFECTUEES SUR LE SITE D'ETUDE.	66

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : PLANNING PREVISIONNEL DES TRAVAUX.	25
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES BANQUETTES TERRASSEES.....	32
TABLEAU 3 : LISTE DES ANOMALIES MAGNETIQUES CALCULEES ET CLASSIFICATION SELON LEUR RISQUE PYROTECHNIQUE POTENTIEL.	48

ANNEXES

ANNEXE 1 : RELEVÉ D'OBSTRUCTIONS ET REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE DU SITE AU 10/03/25	68
ANNEXE 2 : MODE OPERATOIRE EN PHASE DE TERRASSEMENT	76
ANNEXE 3 : MOYENS MATERIELS EN PHASE DE TERRASSEMENT	77
ANNEXE 4 : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE LORS DU TERRASSEMENT DES BANQUETTES SUR LE SITE D'ETUDE LES 28 ET 31/03/25	80
ANNEXE 5 : METHODE DE PROSPECTION MAGNETIQUE.....	92
ANNEXE 6 : METHODE DE PROSPECTION RADAR	95
ANNEXE 7 : METHODE DE PROSPECTION MICROGRAVIMETRIQUE	101

GLOSSAIRE

- **AIPR** : Autorisation d'Intervention à Proximité des Réseaux
- **AMOA** : Assistance à Maîtrise d'Ouvrage
- **AMOA/PYRO** : Assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour la gestion du risque Pyrotechnique
- **AMOA/AMIANTE** : Assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour la gestion du risque Amiante
- **BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- **CCTP** : Cahier des Clauses Techniques Particulières
- **CEREMA** : Centre d'Etudes et d'Expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
- **DOE** : Dossier des Ouvrages Exécutés
- **DICT** : Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux
- **DSOE** : Déviation Sud-Ouest d'Evreux
- **EvDR** : Evaluation Des Risques
- **GPS** : Global Positioning System
- **IGN** : Institut Géographique National
- **LRPC** : Laboratoire des Ponts et Chaussées
- **MOA** : Maîtrise d'Ouvrage
- **MOE** : Maîtrise d'Oeuvre
- **PIC** : Plan d'Installation de Chantier
- **RTK** : Real-Time Kinematic
- **VIC** : Visite d'Inspection Commune
- **UXO** : UneXploded Ordnance

LEXIQUE

- **B-SCAN** : Représentation des variations de permittivité électrique le long d'un profil de mesures et en fonction de la profondeur. « B-SCAN » est le terme anglais pour « radargramme ».
- **Champ magnétique** : Grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace et permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents.
- **C-SCAN** : Terme anglais désignant la concaténation de B-SCAN et leur visualisation en fonction de la profondeur.
- **Gradient magnétique** : Variation du champ magnétique qui permettent de créer des différences d'intensité dans différentes directions de l'espace. Le gradient magnétique vertical mesuré en prospection magnétique correspond à la soustraction de 2 capteurs, divisé par la distance qui les sépare.
- **Magnétomètre à proton** : Appareil servant à mesurer les variations du champ magnétique terrestre en utilisant un champ magnétique fort pour polariser les protons dans un hydrocarbure et détecter alors la fréquence de résonance des protons due à la résonance magnétique nucléaire une fois le champ de polarisation éteint. La fréquence de résonance est proportionnelle à l'amplitude de tout champ magnétique ambiant présent après la suppression du champ de polarisation.
- **Permittivité diélectrique** : Il s'agit d'une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué.
- **Problème inverse** : Détermination des causes d'un phénomène à partir des observations expérimentales de ses effets. Sa résolution passe en général par une étape initiale de modélisation du phénomène, dite problème direct qui décrit comment les paramètres du modèle se traduisent en effets observables expérimentalement. Ensuite, à partir des mesures obtenues sur le phénomène réel, la démarche consiste à approximer au mieux les paramètres qui permettent de rendre compte de ces mesures. Cette résolution peut se faire par simulation numérique ou de façon analytique. La résolution mathématique est rendue difficile par le fait que les problèmes inverses sont en général des problèmes mal posés, c'est-à-dire que les seules observations expérimentales ne suffisent pas à déterminer parfaitement tous les paramètres du modèle, voire de problèmes non linéaires, c'est-à-dire que la modélisation peut s'approcher des observations en s'écartant des paramètres réels. Il est donc nécessaire d'ajouter des contraintes ou des *a priori* qui permettent de réduire l'espace des possibilités de façon à aboutir à une solution unique (notion de convergence).
- **Tomographie** : Technique d'imagerie permettant de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées depuis l'extérieur de cet objet.

1. OBJET DE L'ÉTUDE

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de la déviation Sud-Ouest d'Evreux (DSOE) qui constitue la dernière section du projet de déviation de l'agglomération ébroïcienne (27), situé entre l'échangeur des Fayaux (connexion à la déviation Sud-Est) et celui de Cambolle (connexion à la déviation de Parville).

Préalablement aux travaux, la société TELLUS ENVIRONNEMENT a été mandatée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Normandie (DREAL Normandie) afin de détecter d'éventuelles cavités souterraines susceptibles de renfermer des munitions non-explosées dans l'emprise concernant la création de la bretelle Nord du demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton (27).

Conformément au CCTP¹ établi par la société CESP, il a été demandé :

- D'élaborer une évaluation des risques pyrotechniques (EvdR) couvrant les actions de création de banquettes (terrassements superficiels) et de détections de cavités souterraines ;
- De réaliser des opérations d'aplanissement de banquettes sur les reliefs du site de manière à permettre le passage des appareils de détection ;
- De réaliser des opérations de détections de cavités et d'engins pyrotechnique susceptibles d'être présents dans le sous-sol de la zone des futurs travaux incluant la mise en oeuvre des moyens de détections minimum suivants : magnétométrie, radar géologique basse fréquence et gravimétrie ;
- D'élaborer et de remettre un rapport de détection de cavités souterraines permettant de localiser aussi précisément que possible d'éventuelles cavités souterraines susceptibles de renfermer des objets pyrotechniques.

L'EvdR ayant fait préalablement l'objet de la rédaction d'un document², le présent rapport concerne les opérations d'aplanissement de banquettes et les investigations géophysiques menées sur l'emprise d'étude. La première partie est une présentation du site d'étude. La seconde partie est consacrée à la présentation du phasage des travaux. La troisième partie présente la Phase 1 de cette

¹ Document « CCTP_Détection_cavités_DREAL_Evreux_RN13_indice1_du13_01_24.pdf ».

² Document "PPSPS_DSOE_DREAL_N020250326_R1.docx".

étude, à savoir le terrassement des banquettes. Enfin les deux dernières parties présentent la Phase 2 de cette étude, à savoir les investigations géophysiques, le traitement des données, les résultats et leur interprétation quant aux besoins du client.

2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. Délimitation de l'emprise et présentation du projet d'aménagements

Le site d'étude concerne la DSOE au niveau de la carrière dite du Fond Potier. Il est localisé au lieu-dit « la grille Gibourdelle », en lisière de forêt le long du chemin Potier et en flanc de coteau, à la limite entre Evreux et Arnières-sur-Iton (27) (Figure 1).

Plus précisément, l'emprise d'étude concerne les travaux de création de la bretelle de sortie Nord du demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton nécessitant des terrassements conséquents au droit de l'actuel talus surmontant la carrière du Fond Potier (Figure 2).

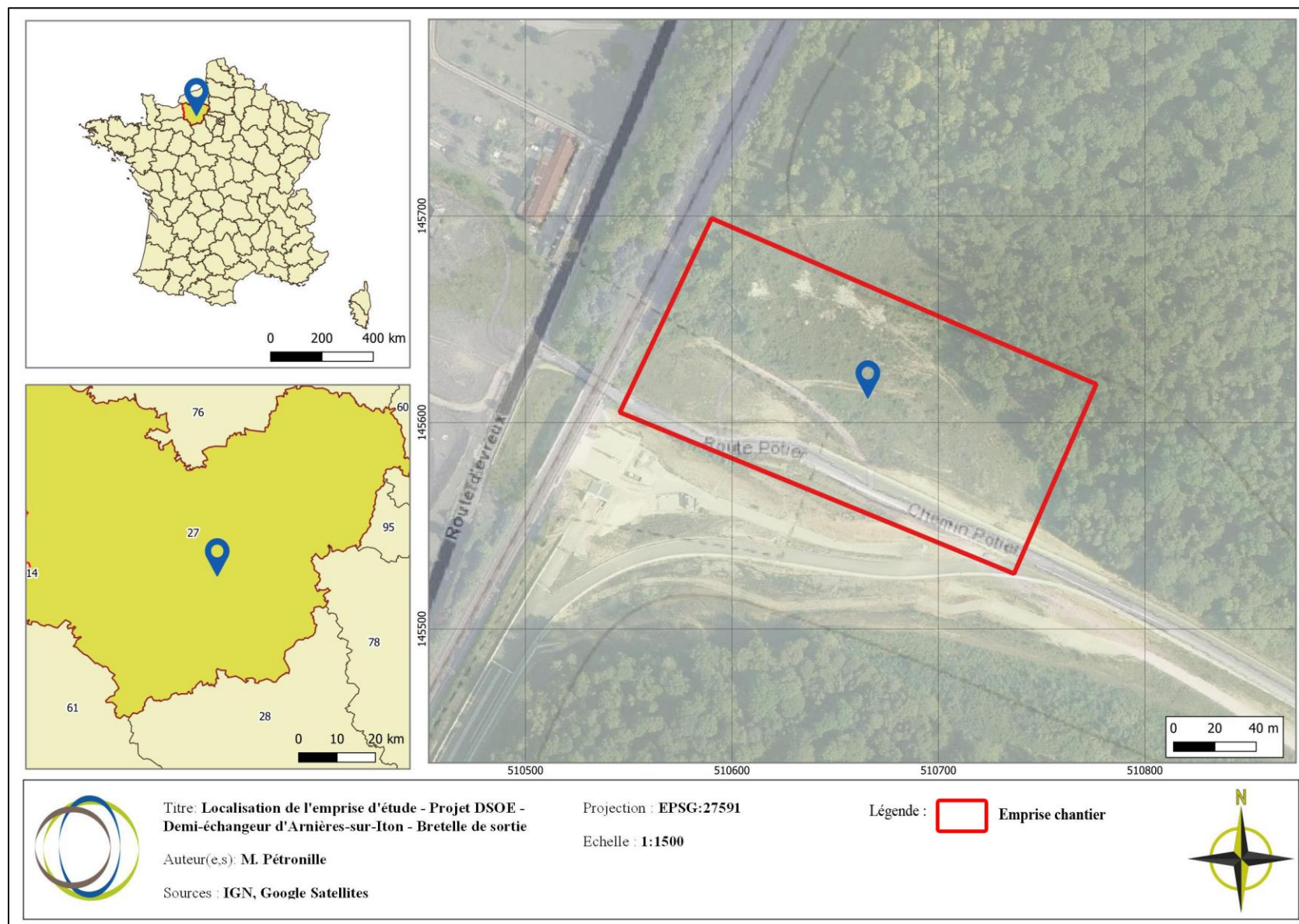


Figure 1: Localisation de l'emprise d'étude – Projet DSOE – Demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton – Bretelle de sortie.

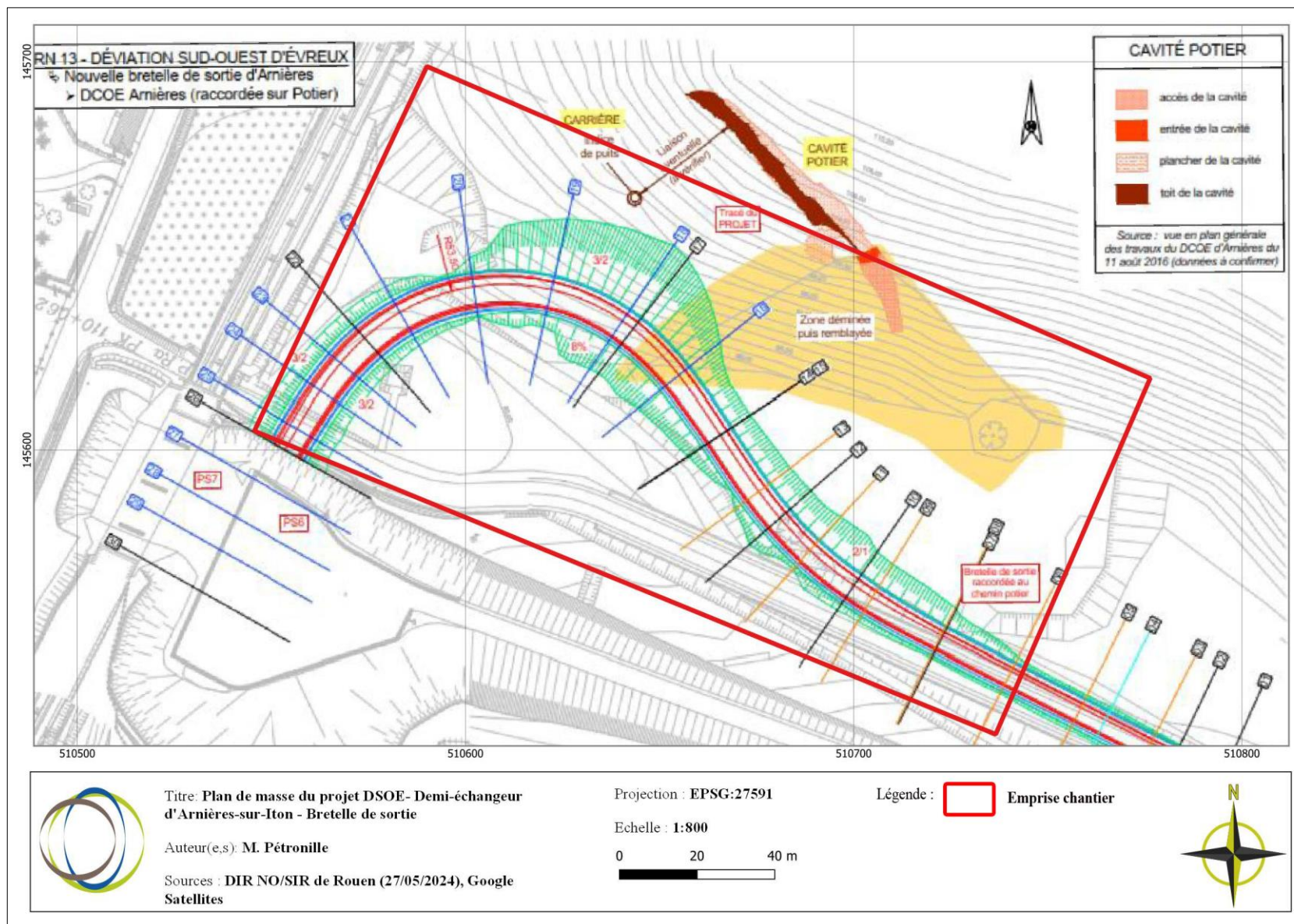


Figure 2 : Plan de masse du projet DSOE – Demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton – Bretelle de sortie.

2.2. Contexte géologique

D'après la carte géologique d'Evreux éditée par le BRGM au 1/50 000^e, l'emprise d'étude se situe au droit d'un substratum sédimentaire crayeux (craie blanche et craie dolomitique du Coniacien-Santonien) caractérisé par la présence de deux carrières (carrière Potier et puits de liaison) (cf risque d'aléa « Cavités souterraines » consultable sur le site www.georisques.gouv.fr) (Figure 3). Le rapport du BRGM référencé RP-52984-FR en date de juin 2004 indique que la carrière correspond à une cavité naturelle composée de deux galeries ayant servi à l'extraction de craie à la fin du Moyen-Âge, à savoir (Figure 4) :

- La galerie principale d'axe approximatif NS-SW et perpendiculaire au versant est longue de 50 m, large de 5 m et haute de 6 à 8 m ;
- Une petite galerie secondaire située à 15 m de l'entrée à gauche est visible sur 10 m de long, 5 m de large et 3 m maximum de haut.

Un plan établi par des spéléologues en 1973 complète le plan du BRGM (Figure 4).

Des sondages géotechniques réalisés sur l'emprise d'étude par le L.R.P.C de Rouen en 2012 (jusqu'à 15 m), le CEREMA en 2019 (jusqu'à 5 m maximum) et la société AERYS en 2023 (jusqu'à 15 m) permettent de préciser la séquence lithologique suivante (Figure 5) :

- De 0,4 à 1 m : formations superficielles constituées de remblais, terre végétale ou terrains remaniés ;
- Sous les formations superficielles : substratum crayeux avec bancs de silex.

Parmi les sondages géotechniques réalisés, les sondages SP38, puis SC37 (déplacé pour couplage à SP38), effectués par AERYS en 2023 ont révélé la présence de vide³ comme suit :

- Vide entre 8,5 et 9,5 m de profondeur pour SP38, suivi d'une zone décomprimée entre 9,5 et 10,0 m ;
- Vide puis remblais d'exploitation de galerie entre 8,3 et 9,8 m.

Ces vides confirment la présence d'une galerie, possiblement en lien avec la carrière Potier.

³ Le sondage S1 a été réalisé à 2 m environ de SC37/SP38. S1 ayant été réalisé jusqu'à 3,6 m de profondeur seulement, il n'est pas impossible que le vide détecté au droit de SC37/SP38 ne se poursuive pas au droit de S1, à plus grande profondeur.

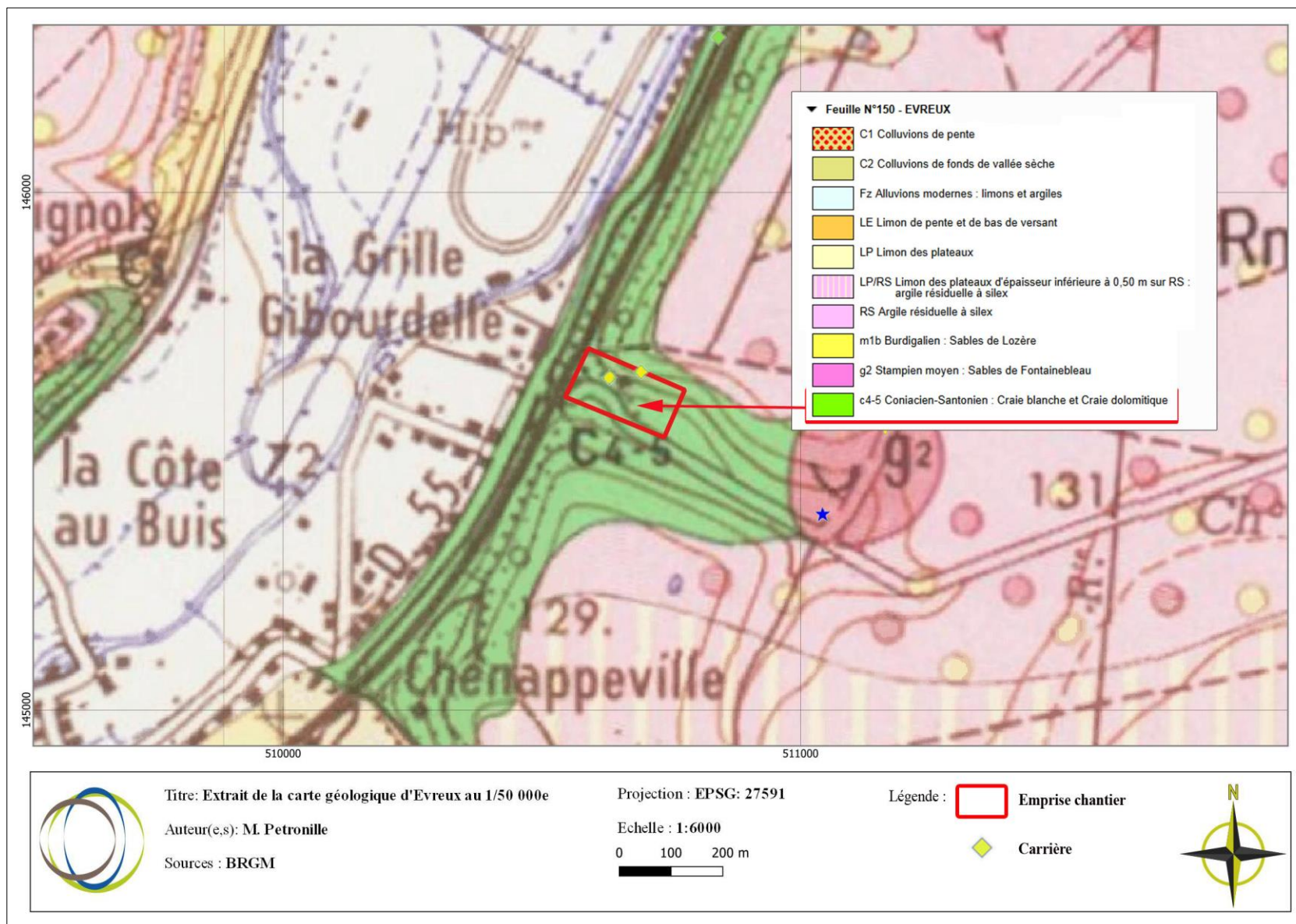


Figure 3: Extrait de la carte géologique d'Evreux au 1/50000e.

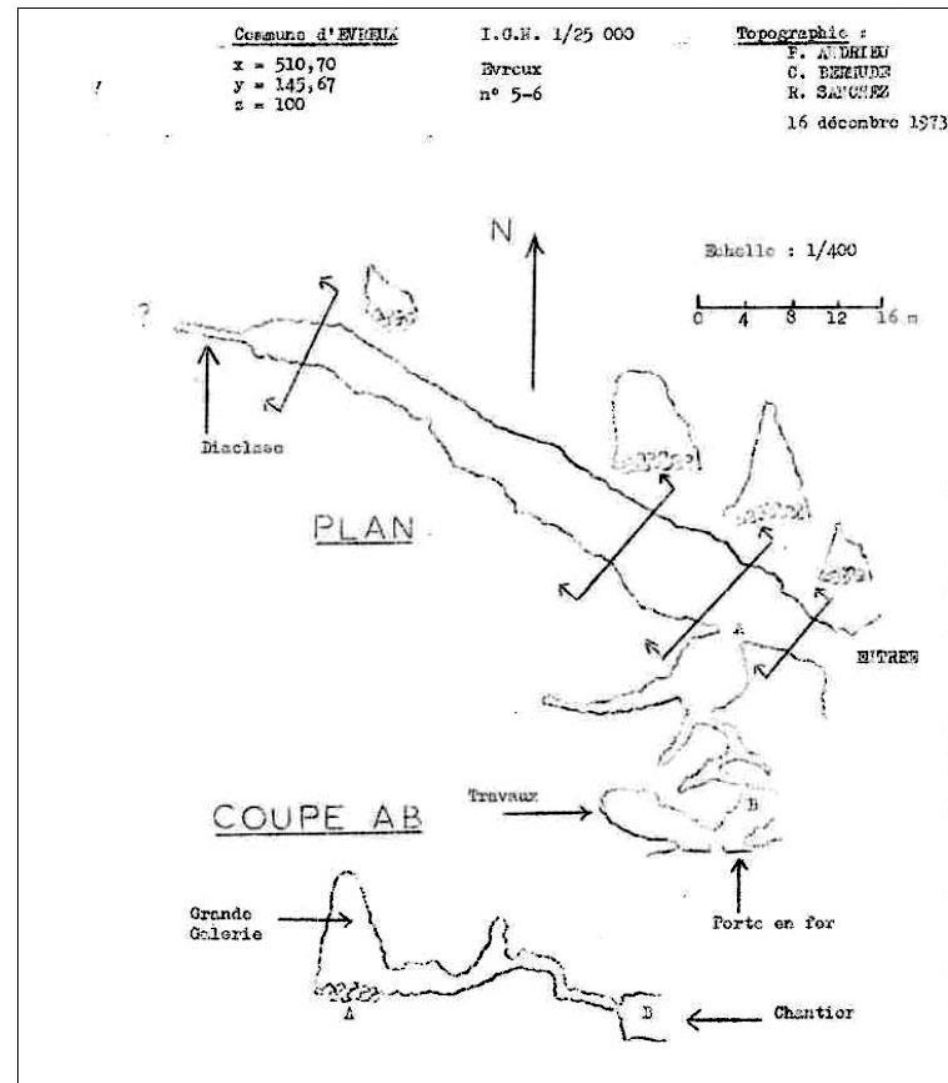
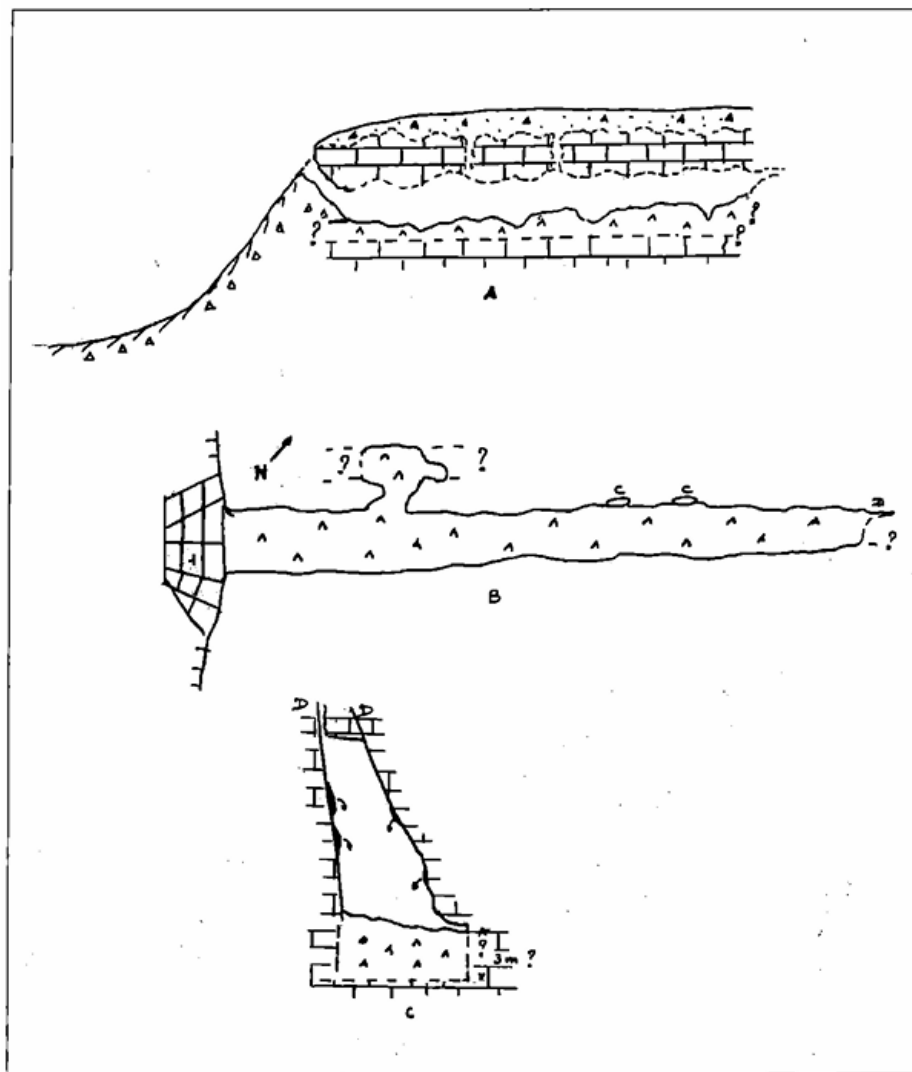


Figure 4 : Plans de la carrière Potier établis par le BRGM en 2004 (à gauche) et par des spéléologues en 1973 (à droite).

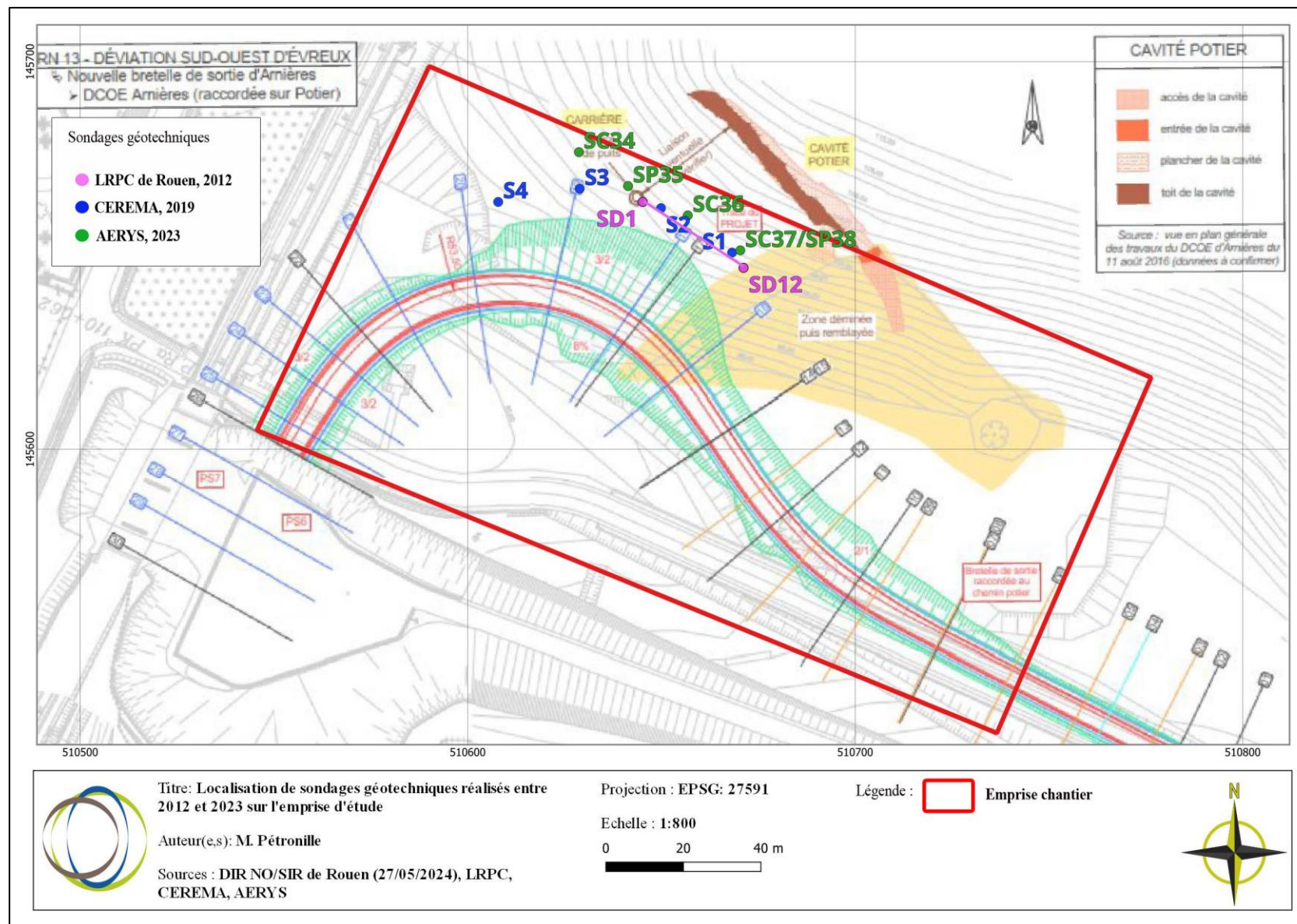


Figure 5: Localisation de sondages géotechniques réalisés entre 2012 et 2023 sur l'emprise d'étude.

2.3. Contexte historique et pyrotechnique

Une étude historique et technique de pollution pyrotechnique et amiante couvrant l'emprise de la zone d'intervention a été élaborée par les sociétés CESP et SCOPING en 2024. L'EHTPPA⁴ indique que :

- Au cours de la Seconde Guerre Mondiale, la carrière Potier aurait servi de dépôt de munitions pour les armées française et anglaise, avant d'être utilisée par les Allemands ;
- A leur départ en 1944, les Allemands auraient procédé à une destruction d'une grande partie des munitions par pétardage interne, modifiant la forme des carrières avec des éboulement de divers toits et galeries ;
- La seule pollution pyrotechnique suspectée présente sur l'emprise étudiée est donc en lien avec ces opérations de stockage de munitions, et de pétardage dudit dépôt ;
- La pollution pyrotechnique suspectée présente l'est uniquement à l'intérieur de cavités souterraines qui sont susceptibles de s'étendre sous la zone de travaux en partie Nord ainsi qu'à l'entrée de celles-ci au Nord de l'emprise ;
- Des munitions stockées ont été successivement trouvées entre 1972 et 2023, dont 7000 bombes incendiaires de 2 kg, 7 bombes allemandes de 500 kg, obus et grenades à main, bombe à ailettes, 2 bombes incendiaires de 50 kg, 1 bombe allemande au phosphore de 500 kg ;
- Aucune présomption de pollution pyrotechnique n'est retenue sur l'emprise pour la guerre de 1870-1871 ni pour la Première Guerre mondiale ;
- A l'inverse, des matériaux amiantés se trouvent *a priori* au Sud de l'emprise (zone de décharge N°2, Figure 6).

En résumé, l'EHTPPA a montré que l'emprise d'étude présente un risque de pollution pyrotechnique avéré et donc élevé associé à la présence de cavités/galeries souterraines, *a priori* plutôt en partie Nord, ainsi qu'un risque de pollution amiantée en lien avec une décharge de déchets du BTP ayant servi dans les années 1980-1990. Le présent rapport concerne davantage le risque pyrotechnique et la sécurisation du futur ouvrage face à ce risque.

⁴ Document « CESP_Scoping_EHTPPA_&_amiante_DREAL_RN1013_EVREUX_27_Indice1.pdf » datant de 2024.

Les munitions de référence choisies pour cette étude sont les suivantes (cf CCTP) :

- Grenade défensive (60g éq. TNT) ;
- Obus de 155mm (9 kg éq. TNT) ;
- Bombe de 250 kg (110 kg éq. TNT).

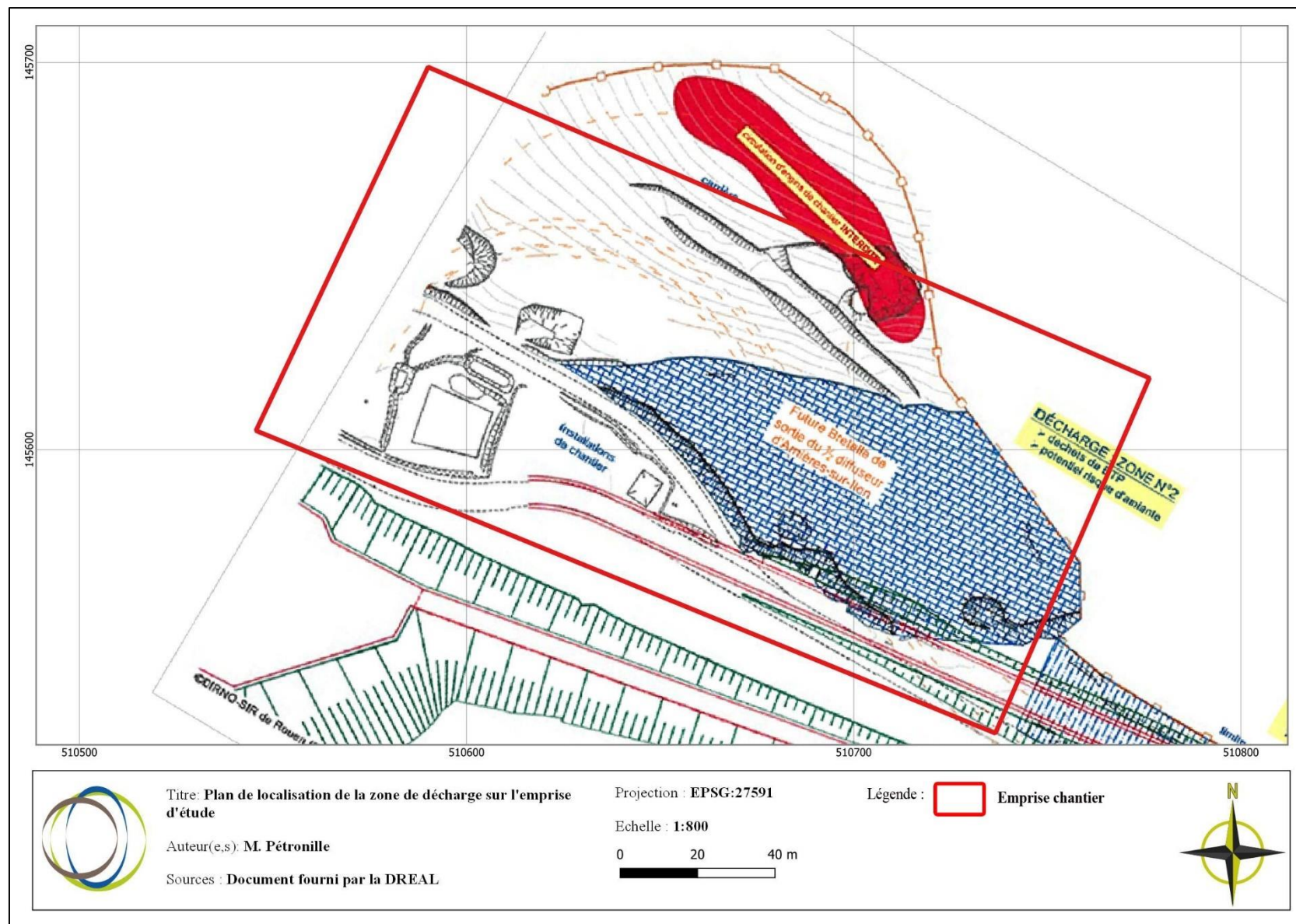


Figure 6 : Plan de localisation de la zone de décharge sur l'emprise d'étude.

2.4. Environnement actuel du site et reportage photographique

Dans sa partie ouest, le site d'étude correspond à une petite colline crayeuse parsemée d'une végétation rase à plus dense. Plusieurs fronts de taille sont visibles (2 dans la partie Sud et 1 dans la partie Nord, en relation avec l'entrée principale de la carrière). La présence d'un certain nombre de gravats (briques, béton, etc.) est visible au droit de la zone de décharge de la Figure 6 qui est aplanie dans sa partie est. Des merlons enherbés bordent l'emprise au Sud et un tas de déblai issu d'un terrassement par NGE (terre + craie à silex) se situe au Sud-Ouest, devant la base-vie NGE.

Un relevé d'obstructions ainsi qu'un reportage photographique (obstructions et vues globales) ont été menés en amont de notre intervention (Annexe 1).

3. PHASAGE DES TRAVAUX

Les travaux dont il est question dans le présent document s'inscrivent en amont de la construction du demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton et visent à sécuriser le futur ouvrage. Il s'agit donc de procéder à la détection et à la localisation d'éventuelles cavités souterraines susceptibles d'être présentes sur l'emprise du projet et pouvant contenir des munitions non-explosées.

Pour ce faire, les travaux se déroulent en 2 phases : le terrassement de banquettes et les mesures géophysiques sur ces dernières. Un schéma simplifié de ces 2 phases est présenté en Figures 7 et 8.

Le planning prévisionnel des travaux, incluant la phase de planification, d'exécution et de clôture, est présenté dans le tableau ci-après.

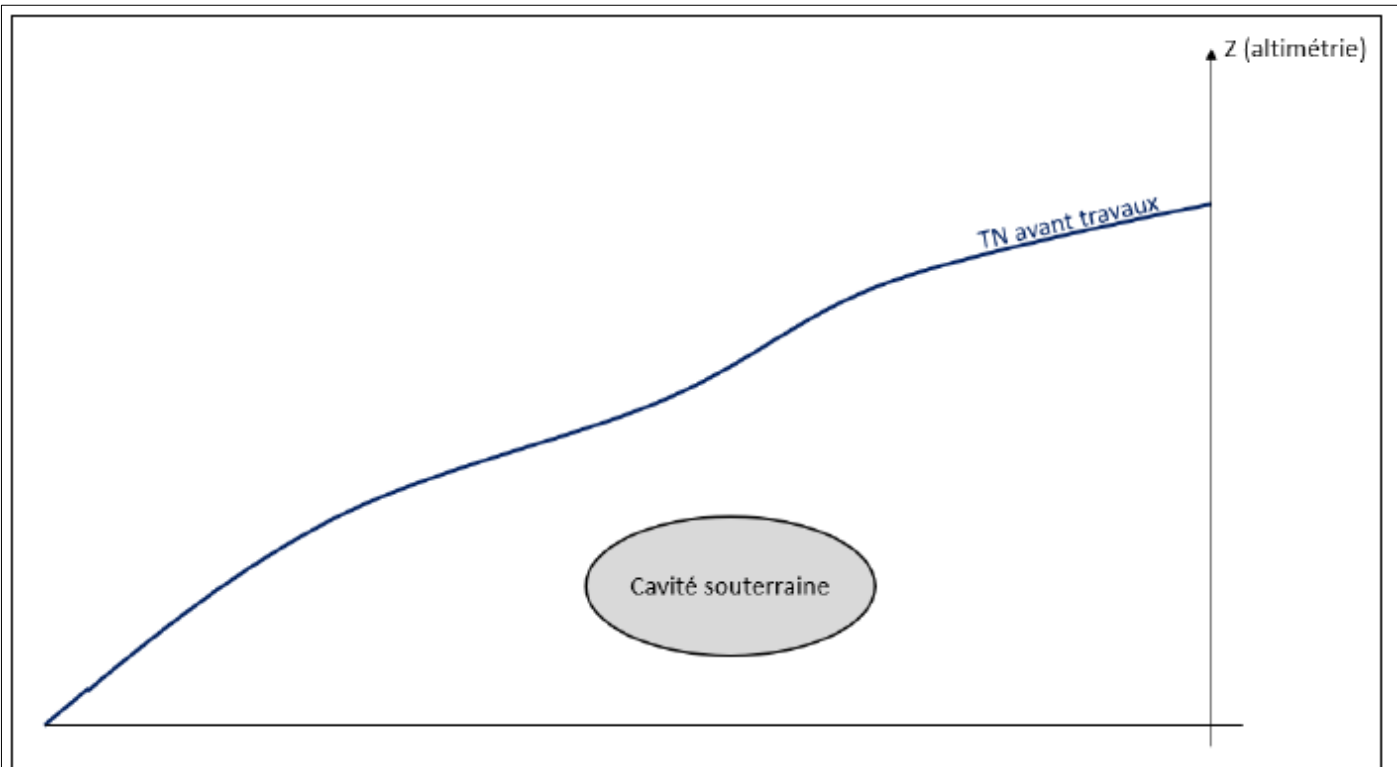
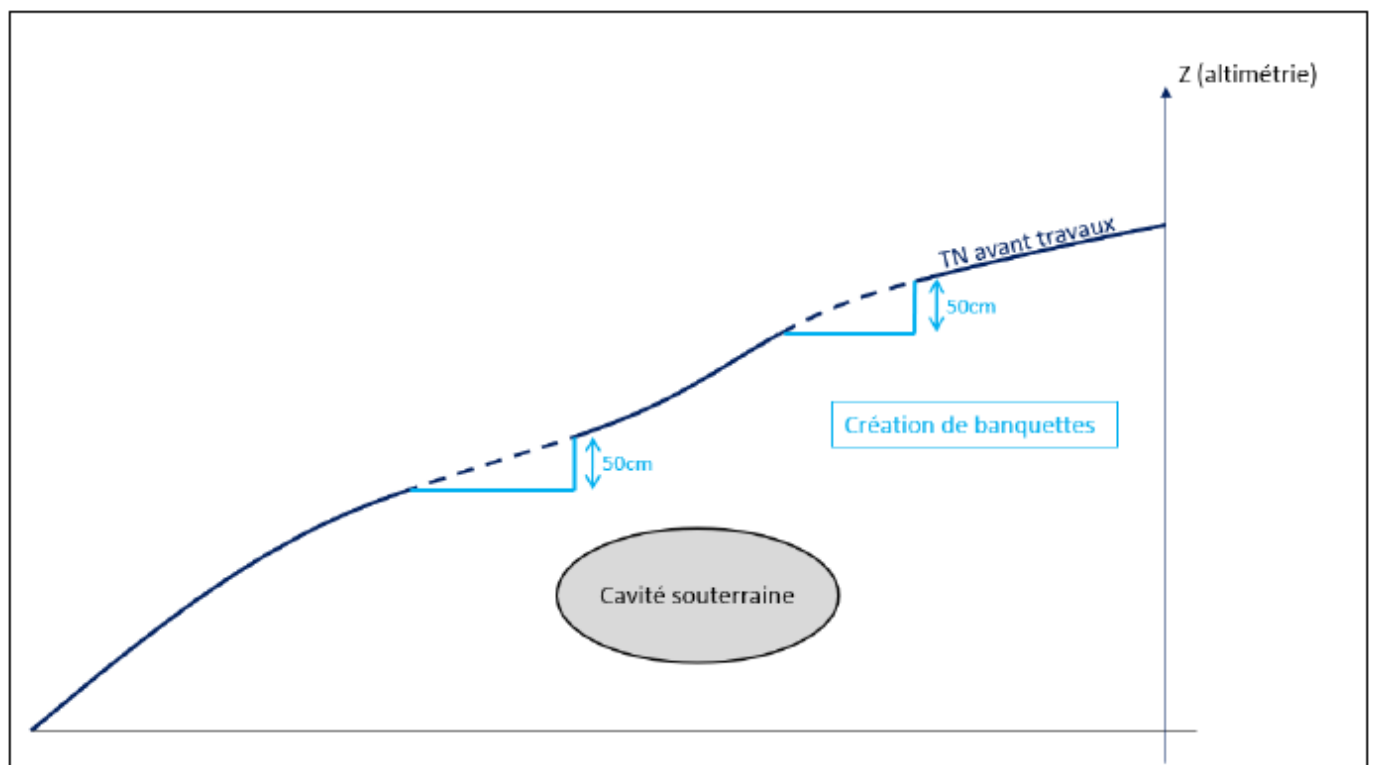


Schéma de la situation initiale avant détection



Phase 1 de détection des cavités souterraines - création de banquettes

Figure 7 : Schémas de la création des banquettes
(Extrait du CCTP élaboré par CESP)

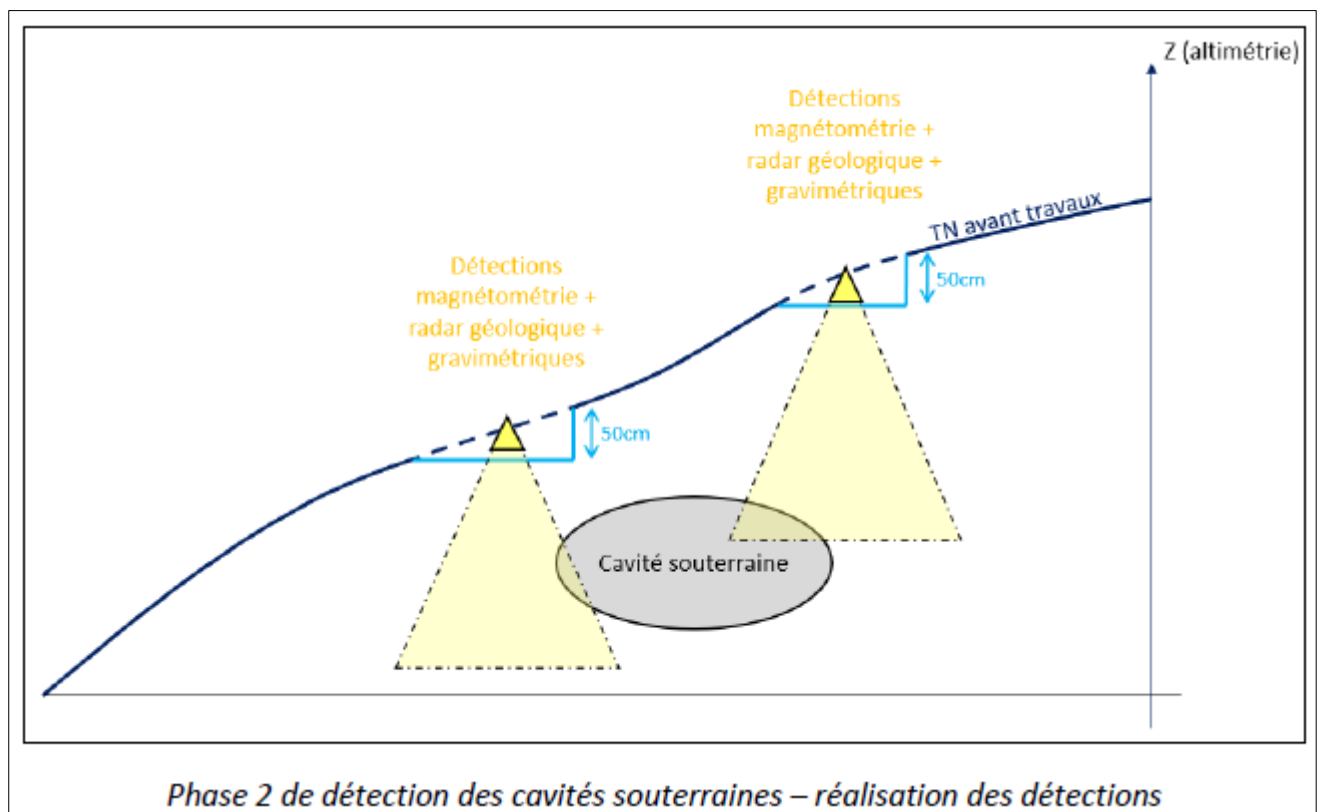


Figure 8 : Schéma de la réalisation des mesures géophysiques en vue de la détection d'éventuelles cavités souterraines

(Extrait du CCTP élaboré par CESP)

	Mars 2025				Avril 2025				Mai 2025		
Actions	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
Validation projet, contractualisation	X										
Pré-visite du chantier, démarches pour location base-vie, mini-pelle, matériel géophysique		X	X								
Rédaction d'une EvdR, du PIC, lancement DICT			X								
Obtention DICT, VIC				X							
Mise en place base-vie, terrassement des banquettes					X						
Mesures géophysiques						X	X	X			
Repli des installations de chantier								X			
Traitement et interprétation des données géophysiques								X	X	X	
Rédaction et émission du DOE										X	X
Apport de modifications au DOE et/ou de documents complémentaires											X

Tableau 1 : Planning prévisionnel des travaux.

4. PHASE 1 : TERRASSEMENT DE BANQUETTES

4.1. Objectif et besoin

Etant donné qu'il est préférable de disposer d'une surface plus ou moins plane pour réaliser des mesures géophysiques fiables, le projet de la DSOE nécessite la réalisation de banquettes.

Afin de couvrir au mieux le talus et de réduire le risque de découverte fortuite d'une cavité, il est demandé de réaliser *a minima* 3 banquettes de 50 cm de profondeur maximum. Un exemple de localisation possible de banquettes sur l'emprise d'étude est présenté en Figure 9.

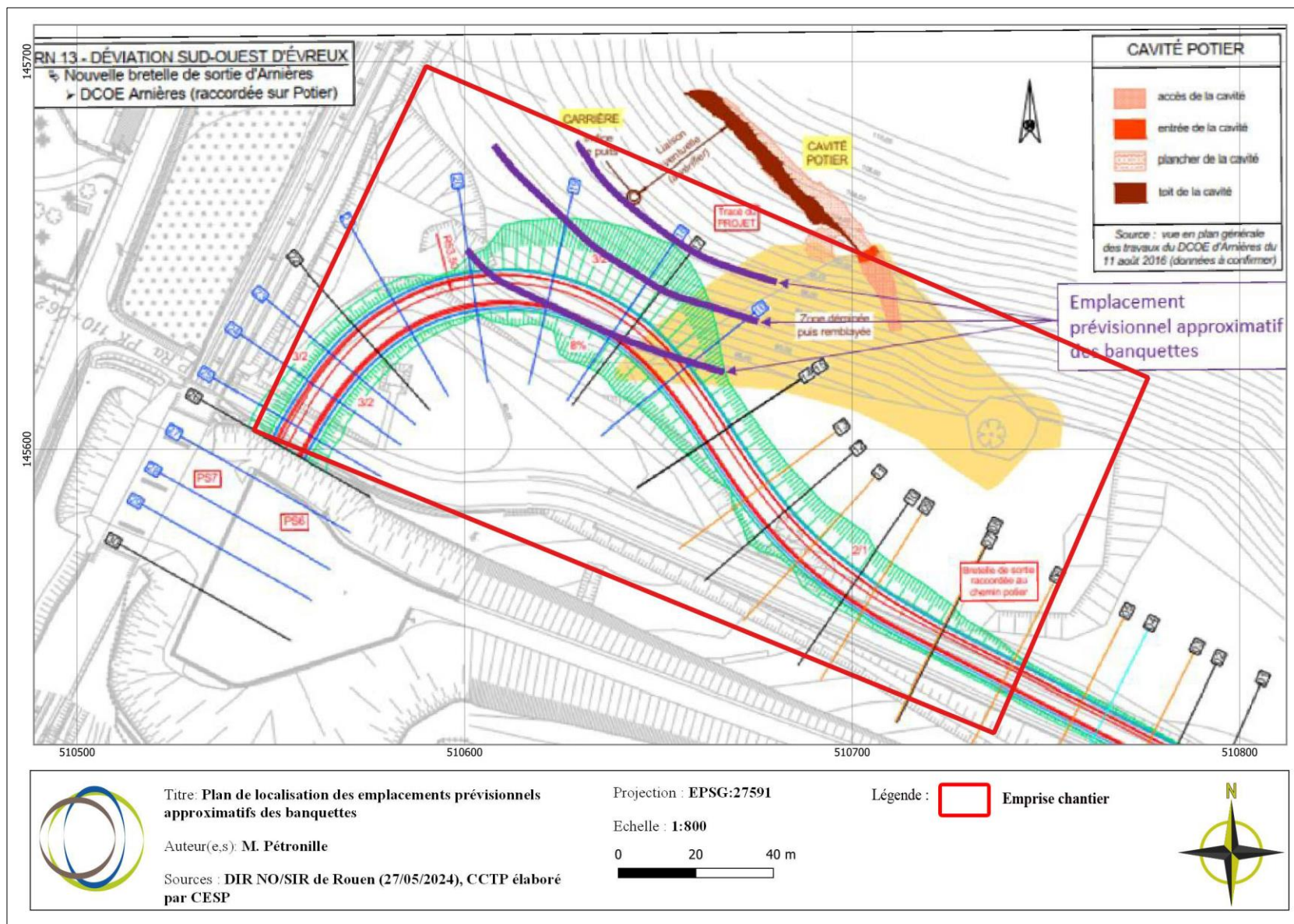


Figure 9 : Plan de localisation des emplacements prévisionnels approximatifs des banquettes sur l'emprise d'étude.

4.2. Principe du terrassement de banquettes

Le terrassement de banquettes sur une colline consiste à créer des plateformes en gradins pour stabiliser le terrain en pente (Figure 10 et Annexe 2). On commence par une étude topographique pour déterminer les niveaux, la pente et les dimensions des banquettes. Ensuite, on délimite les zones à terrasser à l'aide de piquets et de marquages au sol. Les engins de terrassement (pelles, bulldozers) retirent la terre par couches successives, en suivant les pentes prévues. Chaque banquette est créée avec une légère inclinaison vers l'arrière pour assurer le drainage. Le talus entre les banquettes est stabilisé. Les déblais peuvent être réutilisés en remblais pour d'autres zones. Un compactage est effectué à chaque étape pour assurer la solidité. Enfin, un contrôle topographique final vérifie la conformité des travaux.

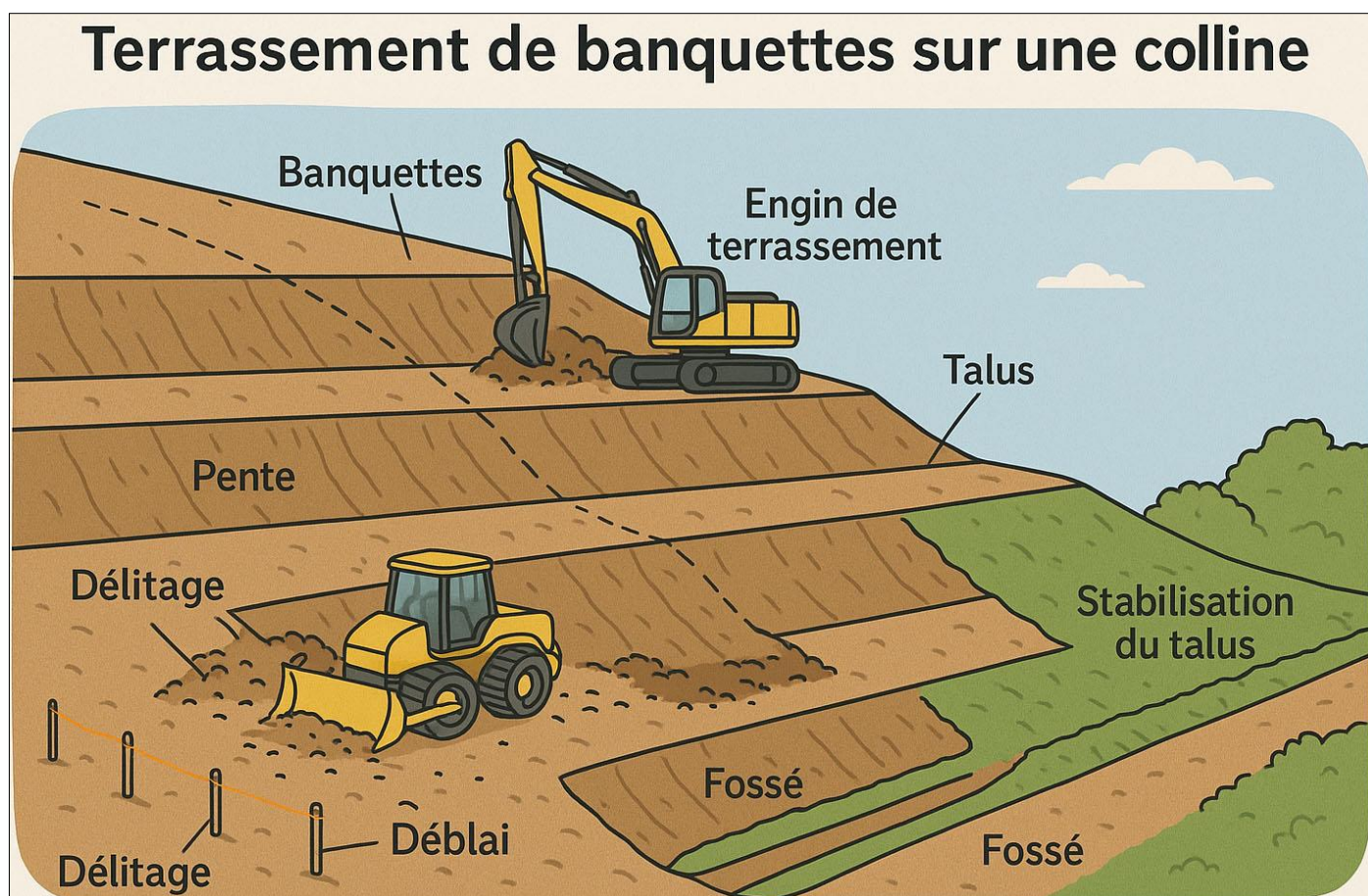


Figure 10.: Schéma du terrassement de banquettes sur une colline.

4.3. Terrassement de banquettes sur le site d'étude

Etant donné la configuration du site et l'objectif de cette étude, il a été décidé, conformément au CCTP, de terrasser 3 banquettes sur l'emprise d'étude (Figure 11).

Les banquettes ont été réalisées les 28 et 31 mars 2025 à l'aide de 2 mini-pelles mécaniques d'au moins 5 tonnes puis ont été aplanies à l'aide d'une lame (Annexe 3). Elles ont été terrassées aussi longuement et largement que possible, et le plus linéairement possible (Annexe 4 pour reportage photographique), tout en limitant au maximum la hauteur des terrassements (en moyenne, ces derniers sont de l'ordre de 50-60 cm pour les banquettes 1 et 2, et de 1 m pour la banquette 3 pour laquelle le risque de découverte de cavité est plus profond étant donné son altitude).

La répartition des banquettes est telle qu'il y a un espacement horizontal variant de 12 à 19 m entre la banquette du haut (notée 3) et celle du milieu (notée 2), et de 7 à 10 m entre la banquette du milieu et celle du bas (notée 1). Nous avons profité de la configuration topographique initiale du terrain pour considérer une quatrième banquette plus en bas encore (notée 0), qui suit une partie de l'ancien chemin Potier et qui remonte en pente douce vers la partie Est de la banquette 1.

Un MNT avant et après terrassement des banquettes est présenté en Figure 12, et les principales caractéristiques des banquettes sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Enfin, afin de mettre en sécurité le chantier (protection des travailleurs, des visiteurs et des riverains contre les risques potentiels), nous avons procédé à l'installation de chainettes et de panneaux de signalisation tout le long de la bordure Est des banquettes (Annexe 4, photo 3).

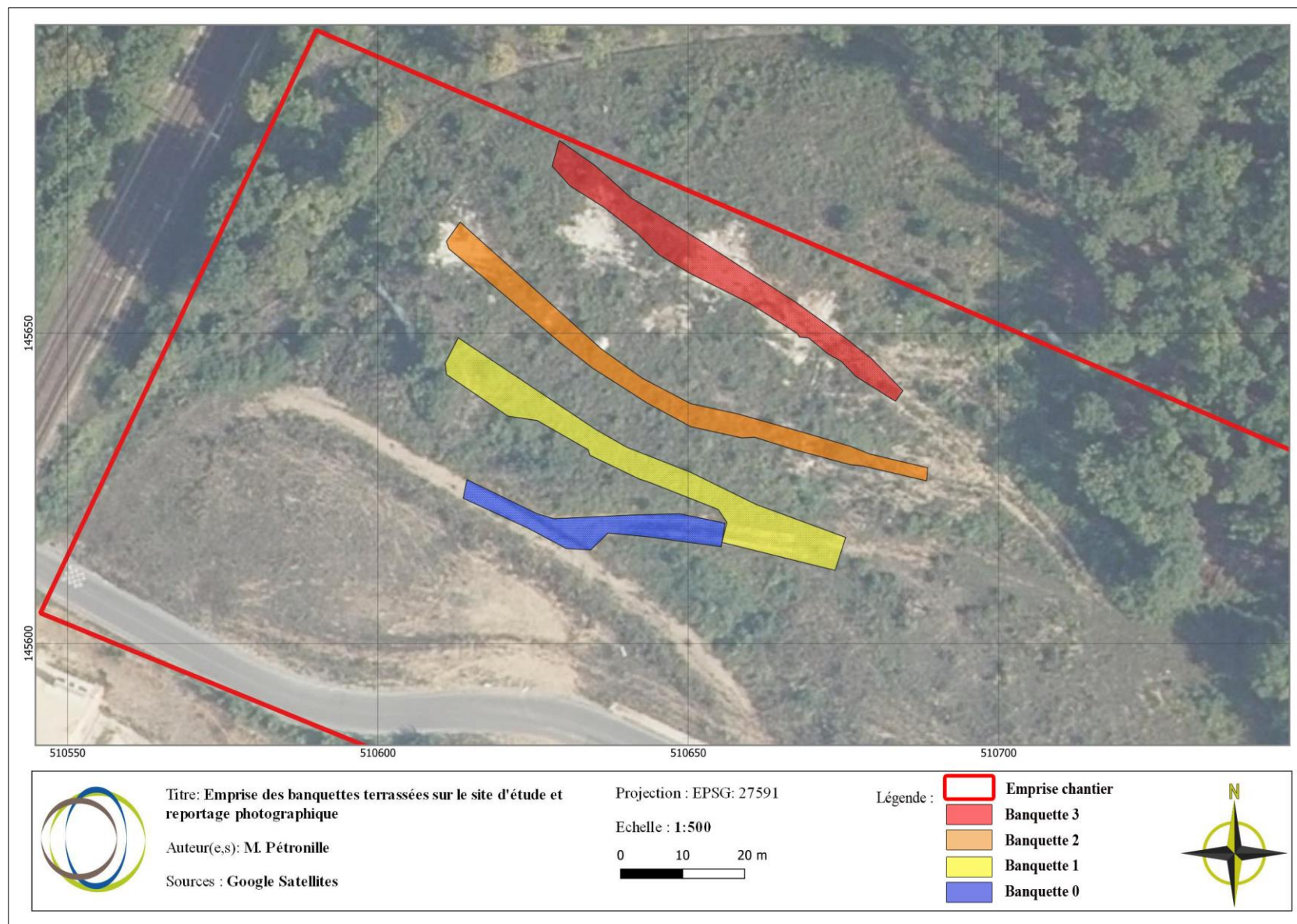


Figure 11 : Emprise des banquettes terrassées sur le site d'étude.

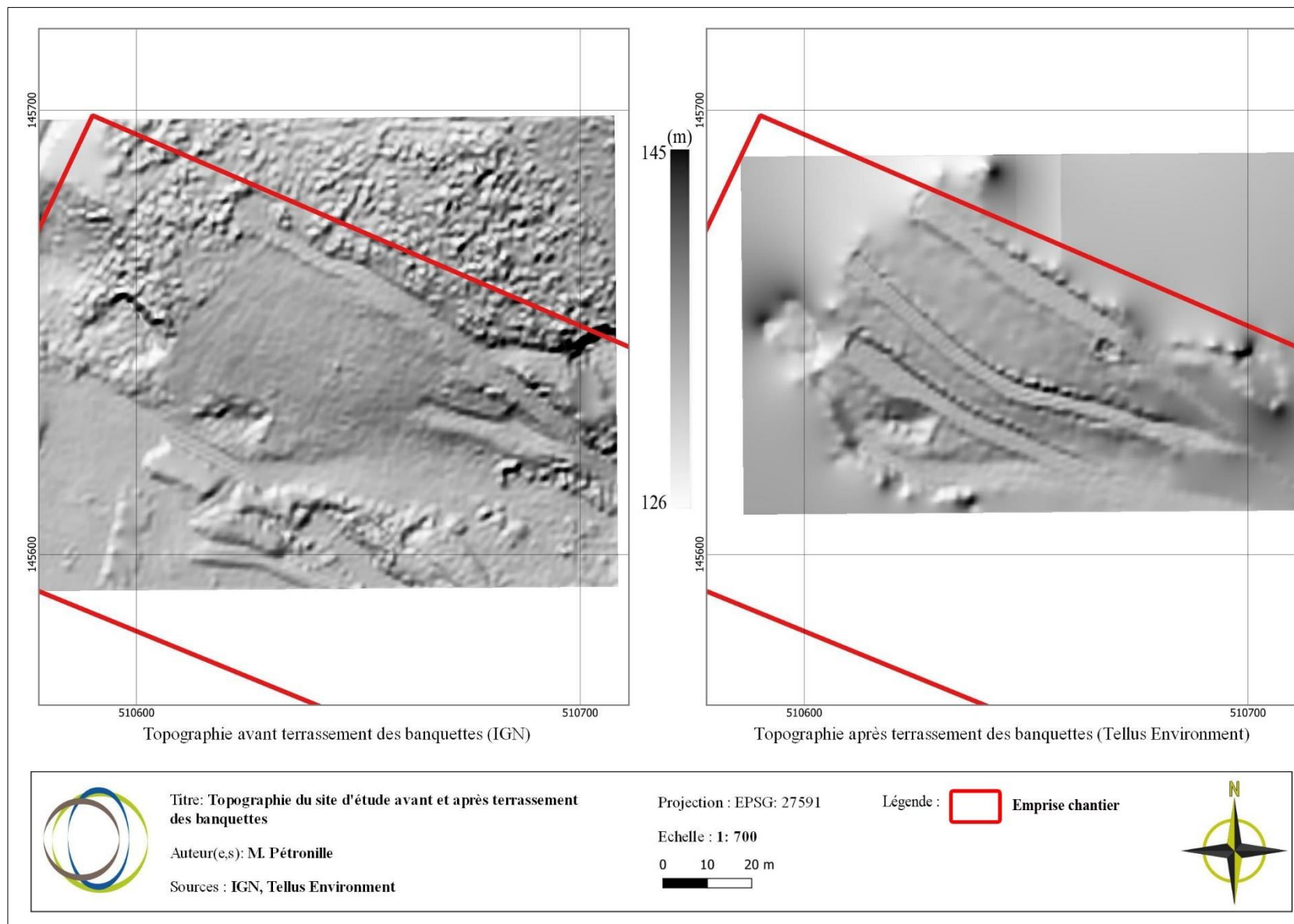


Figure 12 : Topographie du site d'étude avant et après terrassement des banquettes.

ID Banquette	Position sur colline	Longueur	Largeur	Variation topographique	Type d'encaissant suite à terrassement
3	La plus haute	67 m	De 3,5 à 6,5 m	De 141 (chemin à l'Est) à 142,6 m (au centre), puis 141,5 m à l'Ouest → « bombement » de la banquette 3	Craie à silex affleurante, sauf dans l'extrémité Est (pente sur chemin préexistant composée de terre limono- argileuse et gravats)
2	Espacement horizontal de 10 à 19 m sous banquette 3	87 m	De 2 à 3,5 m	De 135,7 à 136,8 m (à l'Ouest)	Craie à silex affleurante, sauf sur l'amorce de banquette préexistante à l'Est (terre limono-argileuse + gravats)
1	Espacement horizontal de 7 à 10 m sous banquette 2	67 m	De 3,5 à 6 m	De 131,4 à 132,5 m → augmentation globale de topographie de l'Est vers l'Ouest	Craie à silex affleurante, sauf sur l'amorce de banquette préexistante à l'Est (terre limono-argileuse + gravats épars)
0	Espacement horizontal de 0 à 12 m sous banquette 1	60 m	De 3 à 4 m	De 127,4 à 129,1 m → augmentation croissante de la topographie de l'Ouest vers l'Est	Terre limono-argileuse, silex. Zone bitumée au droit de l'ancien chemin Potier

Tableau 2 : Caractéristiques des banquettes terrassées.

5. PHASE 2 : MESURES GÉOPHYSIQUES

5.1. Choix des méthodes géophysiques et validation

Etant donné l'objectif de détection de cavités souterraines et d'engins pyrotechniques susceptibles d'être présents dans le sous-sol de la zone des futurs travaux de la DSOE, le CCTP a préconisé *a minima* la mise en œuvre de mesures magnétiques, radar et gravimétriques.

Nous avons validé ce choix en considérant que l'utilisation de ces 3 méthodes géophysiques et de leur couplage sont les plus à même de pouvoir répondre au besoin du client.

5.2. Description des méthodes et protocoles de mesures

5.2.1. Méthode magnétique

Quand le contexte le permet, la méthode magnétique est particulièrement efficace dans la recherche d'objets contenant du fer. Les munitions ferreuses non-explosées (UXO) sont un bon exemple. Un magnétomètre présente l'avantage d'offrir une solution globale et performante pour les mesures de données magnétiques, d'être rapide à mettre en œuvre sur le terrain et d'être léger. Il a pour but d'enregistrer les variations latérales du champ magnétique terrestre, ce dernier étant sensible à la présence d'objets en fer.

D'un point de vue technique, TELLUS ENVIRONNEMENT utilise un magnétomètre à proton GSM19 à effet Overhauser (société GEM systems) possédant 2 capteurs (Annexe 5). La qualité des mesures du GSM-19 se corrige en temps réel sur le terrain grâce à des alarmes préprogrammées. L'effet "overhauser" décuple la sensibilité du magnétomètre à protons standard, ce qui permet de couvrir une large gamme d'intensités, couvrant des valeurs fortes (objets « visibles ») comme des valeurs faibles (objets discrets). Les résultats obtenus sont de très bonne qualité avec une sensibilité de 0,015 nT/√Hz à 1 échantillon par seconde au moins et 5 au plus. Sa résolution est de 0,01 nT. Un filtrage des mesures à 50 Hz permet également de s'affranchir des sources de pollution du type réseaux électriques, etc...

Dans le cas de cette étude, nous avons choisi la cadence d'échantillonnage maximale de 5 Hz, soit 5 échantillons par seconde. Les mesures ont été effectuées avec 2 capteurs mesurant le champ total positionnés à l'horizontale et espacés de 1m (Annexe 5). Dans ces conditions et afin de répondre au besoin du client, les banquettes et, quand cela été possible, les espaces inter-banquettes ont été prospectées avec une maille de 1 m en moyenne, en aller-retours, afin d'établir

une première cartographie (Annexe 5 et Figure 13). Un GPS intégré au magnétomètre (NovAtel) permet d'enregistrer avec une précision de l'ordre de 50 cm la position des mesures centrée entre les deux capteurs. Un calcul de la position GPS des 2 capteurs sera effectué en post-traitement. L'un des avantages des mesures en champ total est que ces mesures montrent des réponses magnétiques d'origine en moyenne plus profondes et permettent d'atteindre une certaine profondeur. Les mesures ont été réalisées avec les 2 capteurs placés en moyenne à 0,80 m du sol.

5.2.2. Méthode électromagnétique « haute fréquence » : le radar

Le radar est une méthode intéressante si le contraste de permittivité diélectrique existant entre le terrain d'étude et les objets recherchés est suffisant. La présence de matériaux très conducteurs (eau, argiles, béton armé ou objets métalliques en grande quantité par exemple) peut en effet venir gêner le retour du signal.

Le matériel utilisé par TELLUS ENVIRONNEMENT consiste en une antenne radar monofréquentielle Zond 12^e (Radsys) émettant à 300MHz, ainsi qu'une antenne radar bifréquentielle CrossOver CO730 (Impulse Radar) émettant à 70 Mhz et 300 MHz (Annexe 6). Le positionnement est assuré par un GPS RTK.

Les mesures ont été effectuées suivant des profils espacés de 1 m, en aller-retours, et parallèles aux banquettes (Annexe 5 et Figure 13). Compte-tenu de la topographie du site, les mesures ont été uniquement effectuées au droit des banquettes.

Pour une permittivité diélectrique donnée (ici choisie à 5), il est possible de descendre théoriquement jusqu'à environ 5 m de profondeur à 300 Mhz et 20 m de profondeur à 70 Mhz.

5.2.3. Méthode microgravimétrique

La méthode microgravimétrique repose sur la mesure de la variation du champ de pesanteur. Une force attractive, définie par la loi de Newton, provoque sur toute masse située à proximité de la surface terrestre une accélération « g » aussi appelée accélération de la pesanteur. Ainsi, toute variation de masse (e.g. cavités) produit une anomalie du champ de pesanteur qu'il est possible de mesurer à condition d'avoir une précision suffisante. La mesure des variations relatives de la composante verticale de « g » est effectuée à l'aide d'un appareil très précis, le microgravimètre. L'unité de mesure est le gal en référence à Galilée : $1 \text{ gal} = 10^{(-2)} \text{ m.s}^{(-2)}$. Les mesures sont réalisées selon un maillage préétabli (implantation de stations de mesure), la taille de la maille variant selon la taille et la profondeur de l'objet recherché.

Après de nombreuses corrections détaillées, l'anomalie de Bouguer est calculée. L'anomalie finale cartée est l'anomalie résiduelle qui correspond à la soustraction de l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer calculée. Très souvent utilisées dans la recherche de cavités puisque le contraste de densité est maximal, ces cartes permettent de mettre en évidence les déficits de masse présents en profondeur et se traduisent, en surface, par une diminution locale de la valeur du champ de pesanteur (anomalie négative). Dans le cas de détection de vide le défaut de masse engendre généralement des anomalies de l'ordre de quelques dizaines de μgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{(-8)} \text{ m.s}^{(-2)}$) mais ces dernières sont intimement liées à la taille, la profondeur de ces vides et aux contrastes de densité vide/encaissant.

Le matériel utilisé ici par TELLUS ENVIRONNEMENT est un microgravimètre Scintrex CG-6 (Annexe 7). La mesure des variations du champ de pesanteur se fait avec une résolution de $1 \mu\text{gal}$ et une répétabilité de $5 \mu\text{gal}$. A chaque mesure, le gravimètre réalise un prétraitement de la valeur lue (moyennes de N mesures, déviation, rejets, filtrage du bruit sismique ambiant) ainsi qu'une correction automatique de l'inclinaison (appareil mis à l'horizontal via un trépied et des vis millimétriques), de la température du capteur et des effets luni-solaires (Annexe 7).

Dans le cadre de cette mission, nous avons choisi d'effectuer par point de mesure (= par station) 1 cycle de 60 s. Compte-tenu de la taille des banquettes et des anomalies potentielles recherchées, les stations ont été implantées tous les 2 m le long de profils parallèles espacés de 1,5 m (Annexe 7 et Figure 13). Au total, 355 stations ont été mises en place. Un relevé GPS et topographique précis a été effectué sur chacune des stations mesurées ainsi que sur les bases (précision de l'ordre de 0,01 m en XY et en Z).

Compte-tenu de la topographie du site, les mesures ont été uniquement effectuées au droit des banquettes et chaque banquette a été individualisée, avec ses stations et sa base.

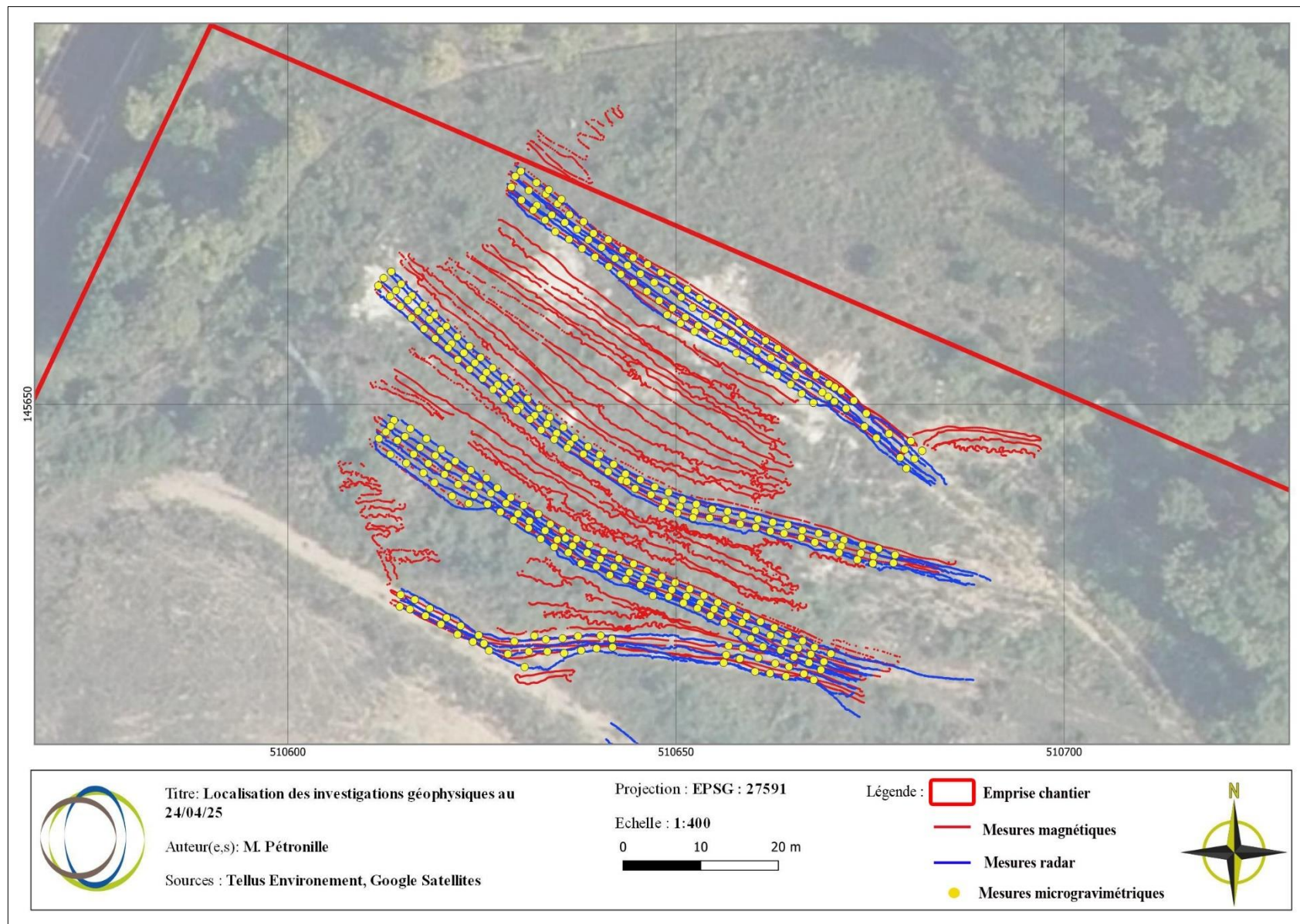


Figure 13 : Localisation des investigations géophysiques au 24/04/25.

5.3. Traitements des données

5.3.1. Protocole de traitement des données magnétiques et méthode d'interprétation

Notre protocole de traitement des données magnétiques comporte plusieurs étapes :

- La première étape consiste à regarder les données brutes acquises, les vérifier et les corriger si besoin. Les données magnétiques brutes acquises se présentent sous la forme d'un fichier texte pour profil de mesures. Les données sont corrigées d'un layback et si besoin d'un filtrage par la médiane (Figure 14). La correction des variations diurnes du champ magnétique terrestre ne s'est pas avérée nécessaire étant donné la rapidité de la prise de mesure. Les valeurs aberrantes liées à des sources venant perturber le champ magnétique par endroit ont été conservées afin de pointer ces zones particulières (zones saturées).
- Une fois les données brutes corrigées et concaténées, nous établissons une visualisation des données magnétiques sous forme de carte 2D géoréférencées. Les données recueillies correspondent à des valeurs du champ magnétique total et du gradient magnétique vertical. Sur les cartes, un premier repérage des zones saturées est établi sur SIG (QGIS). Dans cette étude sont repérées pour les principales zones saturées qui correspondent aux zones à valeurs de champ extrêmes, dans lesquelles il n'est pas possible d'identifier/d'individualiser des structures/objets et qui s'étalent sur une surface importante (rayonnement).
- Une fois les cartes de champ total et de gradient obtenues, les données magnétiques sont inversées via l'utilisation de notre système expert Magsalia. Ce logiciel interne de traitement de données géophysiques a été breveté par l'Université de Bretagne Occidentale et est exploité exclusivement par TELLUS ENVIRONNEMENT. Il permet, par résolution mathématique du problème inverse, de localiser en 3 dimensions des anomalies à partir d'une mesure magnétique. Il offre l'avantage de fournir une richesse d'informations supplémentaires à la cartographie 2D classiquement utilisée en produisant des tomographies qui permettent d'avoir une information fiable sur la localisation des anomalies positives comme négatives en X, Y et Z, et leur équivalent de masse de fer pur.

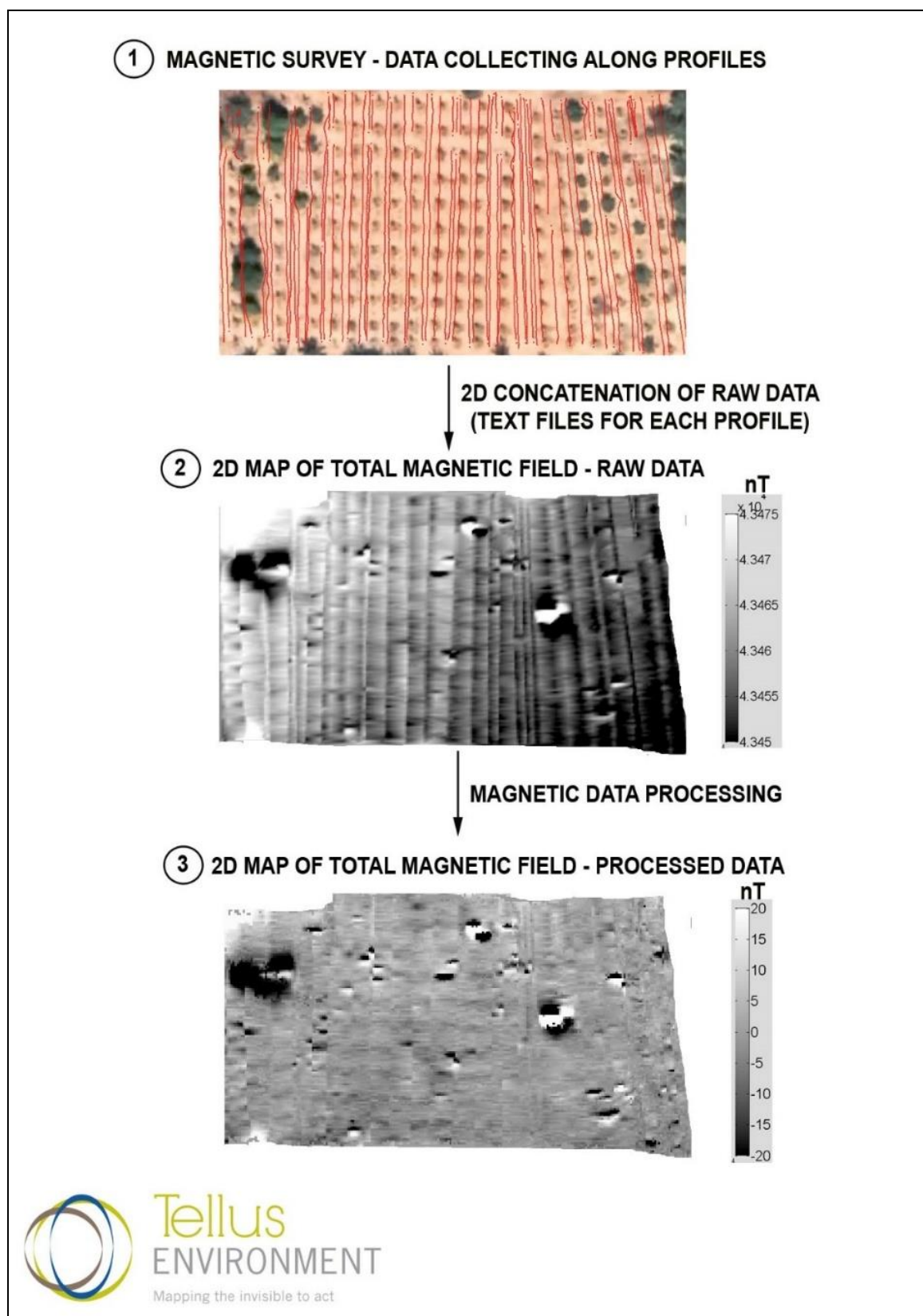


Figure 14 : Processus de traitement des données magnétiques par TELLUS ENVIRONNEMENT.

5.3.2. Protocole de traitement des données radar et méthode d'interprétation

Les données brutes acquises avec le radar sont enregistrées sous la forme de fichiers .SGY et visualisés sous Matlab ainsi que sous le logiciel dédié du ZOND 12^e (PRISM) ou du logiciel GEOLITIX, sous forme de radargramme. Elles nécessitent un certain nombre de traitements afin de mettre en exergue les contrastes de permittivité diélectrique entre des objets et leur encaissant. Parmi les traitements principaux réalisés, on effectue une remise à zéro de l'échelle de temps (remise à zéro de l'échelle équivalente en profondeur), on filtre les données pour éliminer le bruit et on augmente le gain pour voir davantage en profondeur. Chaque radargramme est traité séparément, puis concaténé avec les autres pour produire des décapages virtuels horizontaux en fonction de la profondeur (C-Scan).

La Figure 15 présente le processus global de traitement des données radar par TELLUS ENVIRONNEMENT via son outil interactif développé en interne « TelluScan ».

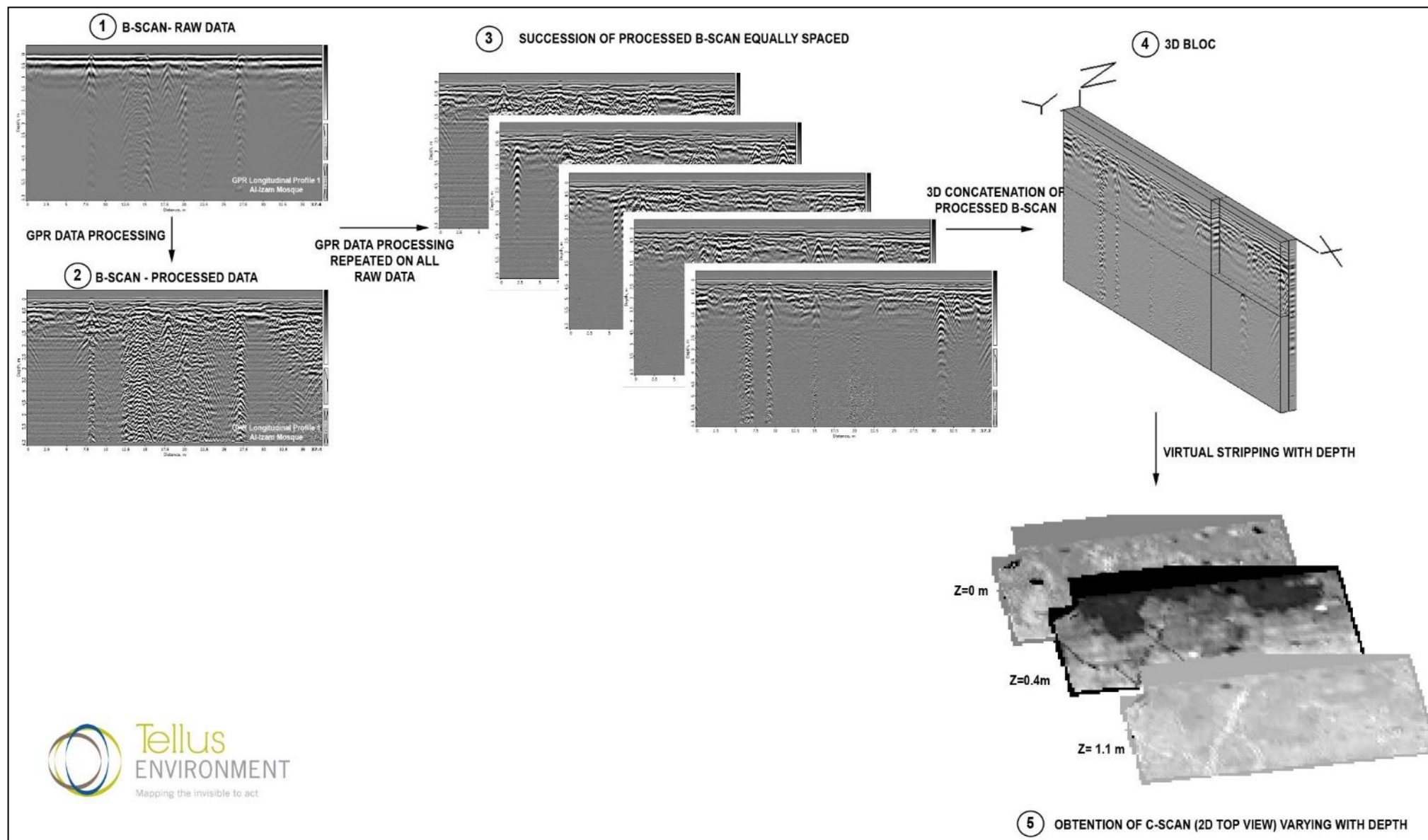


Figure 15: Processus de traitement des données radar par TELLUS ENVIRONMENT.

5.3.3. Protocole de traitement des données microgravimétriques et méthode d'interprétation

De nombreuses corrections des données microgravimétriques collectées sur le terrain sont nécessaires avant obtention d'une cartographie 2D finale :

1. La correction de dérive : il s'agit d'effectuer des corrections luni-solaires (prises en compte automatiquement par l'appareil) et de dérive instrumentale qui est généralement linéaire durant un programme et qui est calculée entre 2 mesures à la base.

2. La correction de latitude : le champ de pesanteur varie en fonction de la latitude, en augmentant de l'Equateur vers les Pôles. A la latitude de 45°, la variation de champ de pesanteur vaut environ 0,8 mgal/km vers le Nord.

L'équation est donnée par : $\Delta g_L = 0,81 \cdot dl \cdot \sin 2\phi \cdot 10^{-3}$ mgal (avec dl=distance Nord-Sud entre base et station où se fait la mesure).

3. La correction à l'air libre : c'est la correction qu'il faut appliquer pour tenir compte du fait que le gravimètre est à une hauteur h positive (ou négative) si le point de mesure est au-dessus (ou au-dessous) de la base.

L'équation est donnée par : $\Delta g_{AL} = 0,3086 (Z_1 - Z_0)$ mgal où $Z_1 - Z_0$ est la différence de hauteur du microgravimètre au point de mesure (station) et à la base de référence.

4. La correction de plateau : elle prend en compte l'influence des terrains entre les stations et la base de référence.

L'équation est donnée par : $\Delta g_P = -0,0419d(Z_1 - Z_0)$ mgal avec d est la densité adimensionnelle et $Z_1 - Z_0$ est la différence de hauteur du sol au point de mesure (station) et de hauteur de sol à la base de référence.

Au final, l'anomalie de Bouguer calculée pour chaque station de mesure est donnée par l'expression suivante :

$$B = g - (g_0 - (\Delta g_L + \Delta g_{AL} + \Delta g_P)),$$

$$\text{soit } B(1) - B(0) = L(1) - L(0) + 0,81 \cdot dl \cdot \sin 2\phi \cdot 10^{-3} + 0,3086(Z_1 - Z_0) - 0,0419d(Z_1 - Z_0)$$

avec base de référence au point le plus bas et station de mesure au point 1 ($L(1)$ et $L(0)$ sont les lectures lues sur le microgravimètre et corrigées de la dérive instrumentale et luni-solaire).

L'anomalie finale pour chacune des stations est l'anomalie résiduelle qui correspond à la soustraction de l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer calculée. Le résultat final se traduit sous forme de cartographie 2D interpolée. Les zones de vide se traduiront par des anomalies négatives.

5.4. Résultats et interprétations

5.4.1. Mesures magnétiques

La concaténation et l'interpolation des données issues des mesures magnétiques se traduisent par l'obtention d'une carte 2D du champ magnétique total (Figure 16) et du gradient magnétique vertical (Figure 17). La surface totale prospectée est de 2900 m².

Sur les cartes 2D, nous distinguons :

- Des zones très intenses (très noires et/ou blanches) : elles se situent dans le tiers Est des banquettes, ainsi qu'au Sud. Elles coïncident avec la zone de décharge N°2 au Sud-Est ainsi qu'avec la zone déminée et remblayée dans le tiers Est de la zone prospectée. Ces zones ne sont pas exploitables et sont considérées comme saturées (zones d'ombre) : les calculs de cibles ne peuvent pas être effectués de manière fiable sur ces zones qui peuvent masquer potentiellement des munitions ;
- Quelques anomalies dipolaires (pôle positif (blanc) associé à un pôle (négatif)), voire unipolaires (un seul des 2 pôles), qui s'individualisent dans un encaissant de valeurs moyennes (neutres). Ces anomalies sont généralement associées à des obstructions de surface relevées sur site (cf Annexe 1) ainsi qu'à des anomalies détectées au détecteur de métaux⁵. Il est à noter que ces anomalies sont localisées au droit des zones saturées préalablement délimitées.

Les calculs d'inversion via notre logiciel Magsalia ont conduit à la détection de 26 anomalies situées majoritairement dans le premier mètre sous la surface, parmi lesquelles (Figure 18 et Tableau 3) :

- 16 cibles pour lesquelles il n'est pas possible de conclure quant au risque pyrotechnique car elles se situent en zones saturées (en blanc sur la Figure 18) ;
- 1 cible est classée en risque nul (en vert sur la Figure 18) car il s'agit d'une obstruction de surface repérée sur site (plateforme en béton armé) ;
- 7 cibles sont classées en risque pyrotechnique faible (en jaune sur la Figure 18). Ces cibles ont un poids calculé relatif faible et sont sub-superficielles;

⁵ Les mesures au détecteur de métaux ont été réalisées ponctuellement et n'ont pas un caractère exhaustif, le but étant d'évaluer approximativement la limite de la présence d'objets polluants magnétiquement parlant.

- 2 cibles sont classées en risque pyrotechnique moyen (en orange sur la Figure 18. Ces cibles forment soit un monopôle (cas de la cible 13), soit un dipôle (cas de la cible 15) assez larges et sont un peu enfouies.

En plus des anomalies ponctuelles calculées, nous avons localisé, sur la carte du champ total, une zone montrant potentiellement une large anomalie dipolaire, à proximité du sondage SC37 au droit duquel une bombe au phosphore a été trouvée en profondeur. Cette possible anomalie peut être liée aux remblais et à la zone de décharge située à l'Est, comme elle peut indiquer la présence d'une source ferreuse de grande ampleur et profonde. Cette zone n'ayant pas pu être prospectée en totalité du fait de la végétation dense et du relief, il n'est pas possible d'inverser correctement les données magnétiques localement. Les résultats issus des données radar et microgravimétriques présentés ci-après pourront peut-être confirmer ou infirmer cette hypothèse.

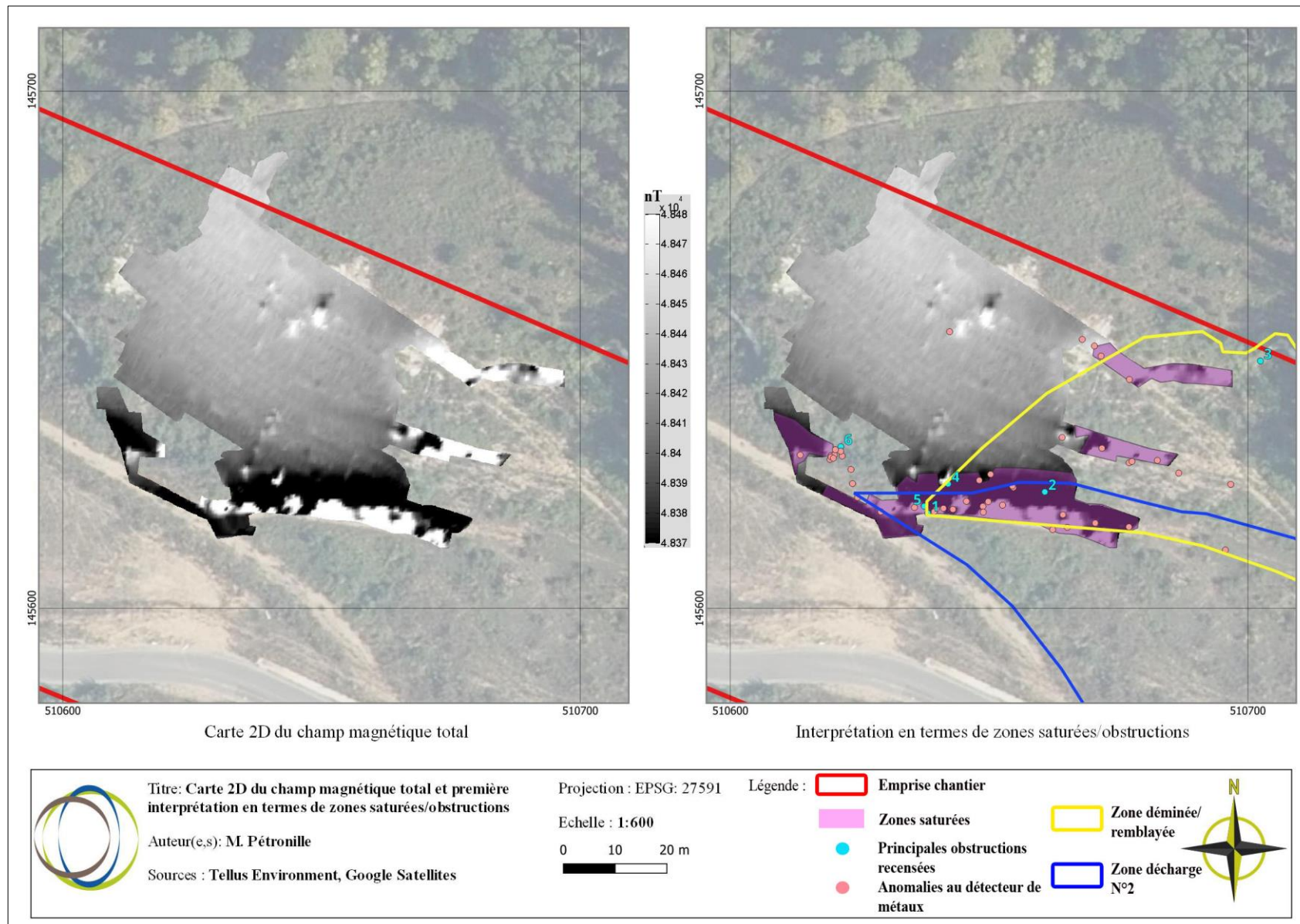


Figure 16 : Carte 2D du champ magnétique total et première interprétation en termes de zones saturées/obstructions.

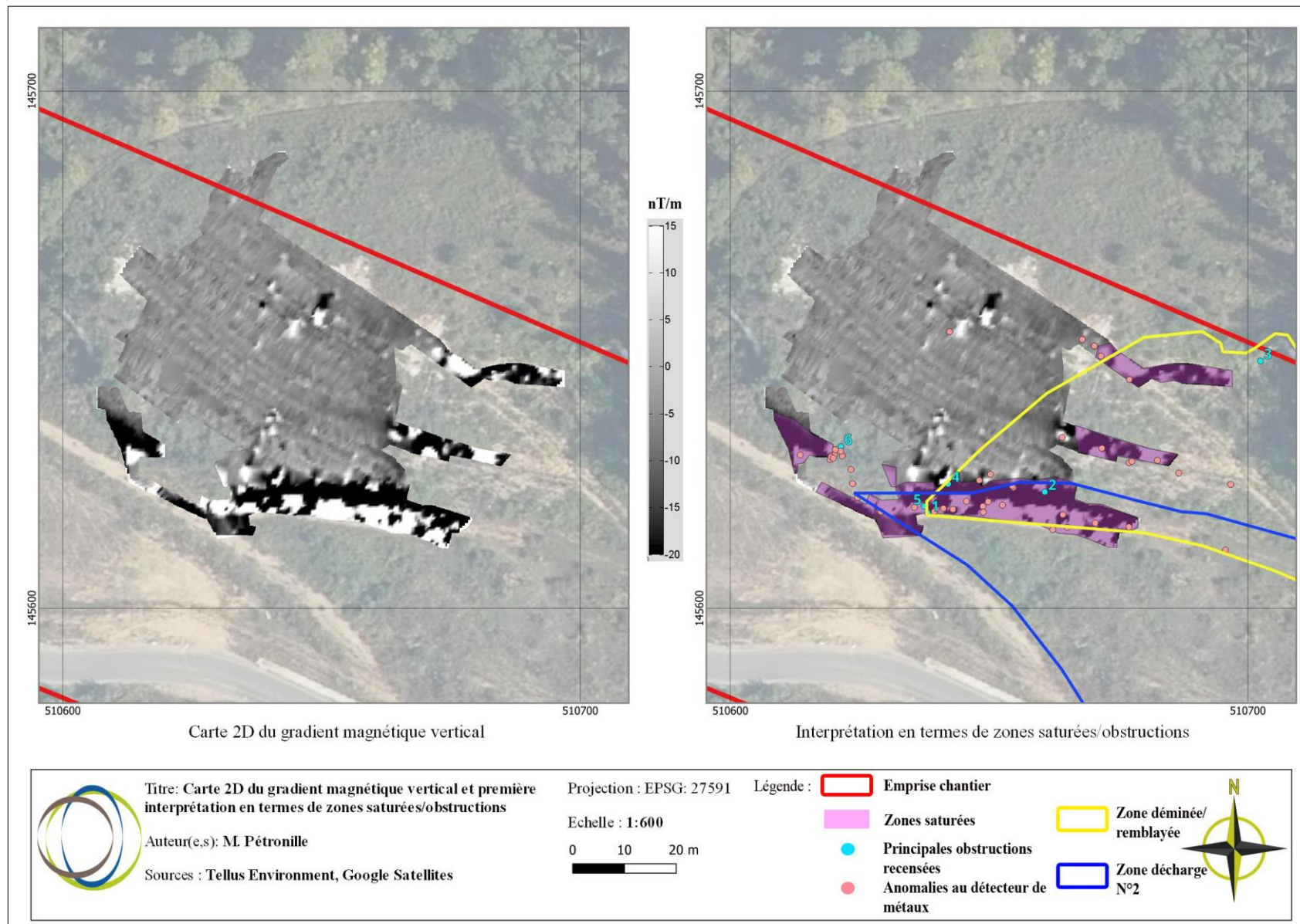


Figure 17: Carte 2D du gradient magnétique vertical et première interprétation en termes de zones saturées/obstructions.

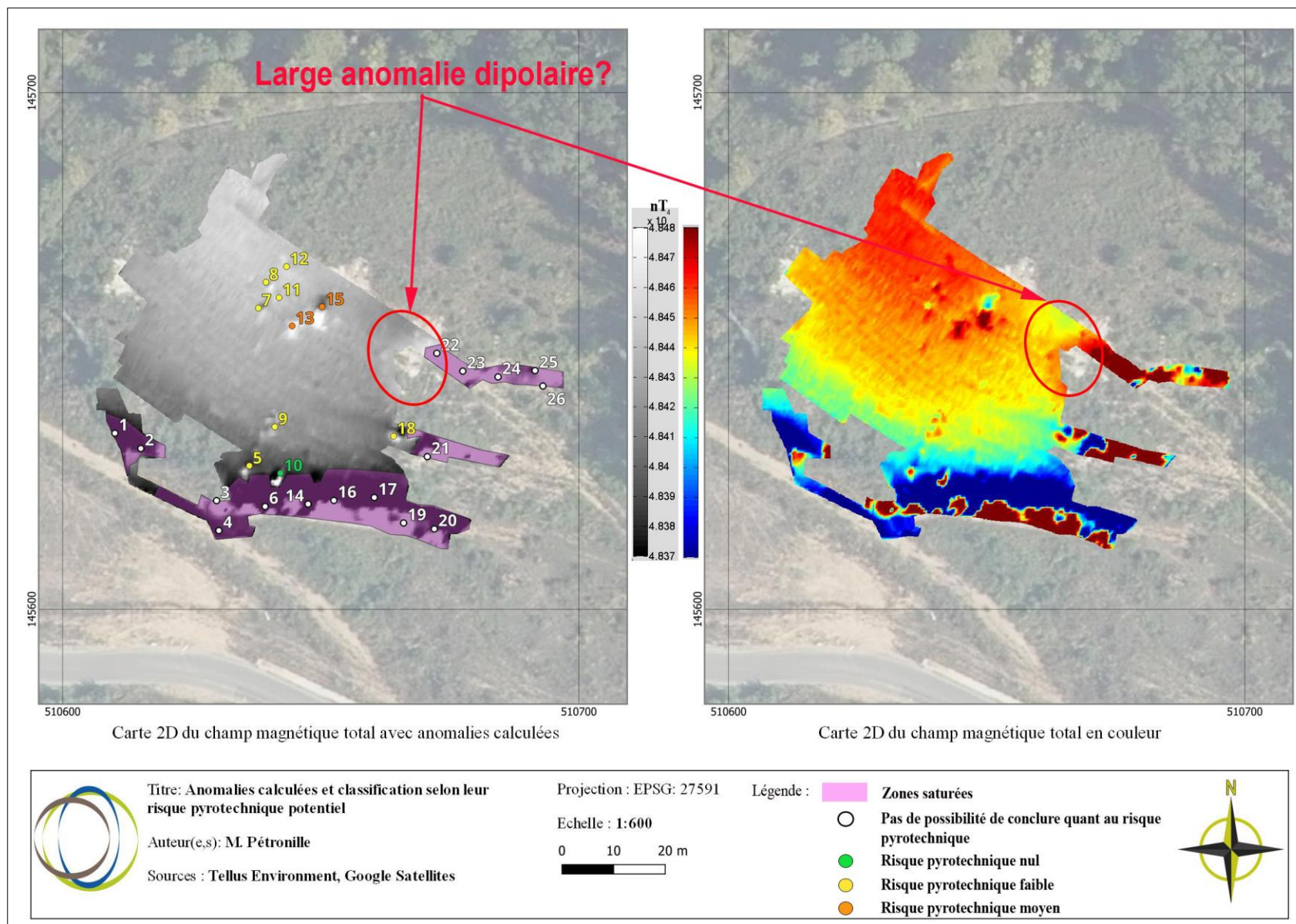


Figure 18 : Anomalies calculées et classification selon leur risque pyrotechnique potentiel.

ID cible	X (NTF (Paris)/ Nord France) ¹ (+/- 1 m)	Y (NTF (Paris)/ Nord France) ¹ (+/- 1 m)	Z (m) ² (Incertitude 50%)	Indice de localisation ³	Indice de pesage ⁴	Commentaires	Risque pyrotechnique potentiel estimé ⁵
1	510611.18	145634.65	-0.2	0.71	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
2	510616.20	145631.69	-0.8	0.77	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
3	510630.88	145621.61	-0.6	0.64	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
4	510631.32	145615.81	-0.2	0.47	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
5	510637.22	145628.35	-0.5	0.75	++		Faible
6	510640.28	145620.48	-0.4	0.68	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
7	510638.99	145658.87	-0.2	0.65	+		Faible
8	510640.45	145663.88	-0.2	0.69	+		Faible
9	510642.17	145635.89	-0.7	0.46	+	Alignement cibles	Faible
10	510643.24	145626.90	-0.2	0.77	+++	Plateforme béton armé	Nul
11	510642.98	145660.90	-0.2	0.65	+		Faible
12	510644.43	145666.91	-0.4	0.69	+		Faible
13	510645.52	145655.42	-0.5	0.69	++	Anomalie détecteur de métaux	Moyen
14	510648.61	145620.94	-0.5	0.67	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
15	510651.32	145659.13	-0.8	0.69	++		Moyen
16	510653.61	145621.65	-0.7	0.5	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
17	510661.44	145622.21	-0.8	0.56	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
18	510665.18	145634.07	-0.2	0.64	++	Anomalie détecteur de métaux	Faible
19	510667.11	145617.28	-0.5	0.97	++++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
20	510673.07	145616.13	-0.3	0.97	++++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
21	510671.71	145630.12	-0.6	0.65	+++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
22	510673.56	145650.13	-1.4	0.8	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
23	510678.58	145646.67	-0.5	0.76	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
24	510685.42	145645.55	-0.7	0.76	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
25	510692.58	145646.78	-0.2	0.84	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure
26	510694.10	145643.79	-0.2	0.84	++	Zone saturée	Pas de possibilité de conclure

¹ Les coordonnées X et Y des cibles sont exprimées en RGF (Paris)/Nord France. L'incertitude de positionnement associée est considérée comme étant de 1 m autour de la position indiquée.

² Il s'agit de la profondeur Z moyenne calculée pour chacune des cibles. Une incertitude de 50% de la profondeur indiquée est associée.

³ L'indice de localisation est compris entre 0 et 1. Plus il est grand plus la source de l'anomalie est ponctuelle et inversement.

⁴ L'indice de pesage est relatif et ne donne pas de valeurs absolues. Les signes +, ++, +++ et ++++ traduisent un classement croissant des cibles en fonction de leur poids relatif en fer pur.

⁵ La classification des cibles en fonction du risque pyrotechnique potentiel est établie via la concaténation de l'ensemble des informations acquises (indices de localisation et de pesage, profondeur estimée relative, polarité des anomalies, contexte environnemental, etc.). Le code est le suivant : blanc → pas de possibilité de conclure quant à un risque pyrotechnique potentiel, vert → risque nul, jaune → risque faible, orange → risque moyen.

Tableau 3 : Liste des anomalies magnétiques calculées et classification selon leur risque pyrotechnique potentiel.

5.4.2. Mesures radar

Les radargrammes obtenus sur le site d'étude via les 2 antennes mono- et bifréquentielles sont de bonne qualité et montrent un certain nombre de contrastes (horizons, hyperboles, etc...).

Chaque banquette a été traitée séparément, par analyse des B-SCAN comme des C-SCAN. Les résultats sont les suivants :

- Banquette 3 : les B-SCAN obtenus à 300 Mhz montrent la présence de bancs calcaires sub-horizontaux sur l'ensemble des 6 profils, souvent entrecoupés de zones probablement plus argileuses du fait de l'atténuation du signal. Le sol est plus calcaire pour les profils les plus au Nord, et inversement. Nous constatons également que les 10 m les plus à l'Est des profils (zone en pente) ne sont pas particulièrement exploitables car le signal s'atténue très vite. L'exemple du profil N°2 (plus proche du Nord que du Sud) est donné en Figure 19. On observe la présence d'une zone calcaire dense sur le B-SCAN, qui se traduit sur un C-SCAN obtenu à 80 cm de profondeur par une zone plus claire, bien délimitée. Directement à l'Est de cette zone, nous observons un fort réflecteur sub-horizontale juste sous la surface du sol, verticalement aligné avec une hyperbole (noté 0 sur Figure 19). Sa position est très proche de celle du sondage SC37 au droit duquel un vide et une bombe au phosphore ont été détectés.

L'étude des B-SCAN à 70 Mhz montre la présence de réflecteurs intenses entre 9 et 10 m de profondeur environ, dont l'une (anomalie 1 sur Figure 20) se situe à la bordure entre les 2 zones décrites auparavant. Ces hyperboles traduisent possiblement la présence de cavités. Mais l'hyperbole 1 peut aussi traduire le passage latéral d'un type de couche à une autre (limite entre l'encaissant et une cavité plus à l'Est ?). Une hyperbole de plus grande longueur d'onde est possiblement présente au droit de la zone Est au signal atténué, mais la présence de matériaux trop argileux ne permet pas de conclure de manière fiable. Une cavité est donc peut-être présente à l'Est de l'hyperbole 1.

L'étude de B-SCAN plus au Sud de la banquette 3 (profils 4 à 6) a permis de mettre en évidence une zone d'environ 4 à 5 m de diamètre caractérisée par un réflecteur sub-surfacique intense, puis immédiatement en-dessous une zone d'atténuation du signal bordée de part et d'autre par des bancs calcaires interrompus. Cette zone (notée 4 sur la Figure 21) est localisée au droit du possible puits indiqué sur le document fourni par la DIR NO/SIR de Rouen. Plus à l'Est, des réflecteurs intenses à environ 2,5 et 5 m de profondeur sont visibles, mais ils ne sont clairement visibles que sur le profil N°4 (noté 5 sur Figure 21). Enfin, nous retrouvons au même endroit sur le profil N°4 les réflecteurs observés sur le profil N°2 et situés à proximité directe du sondage SC37 (noté 3 sur Figure 21).

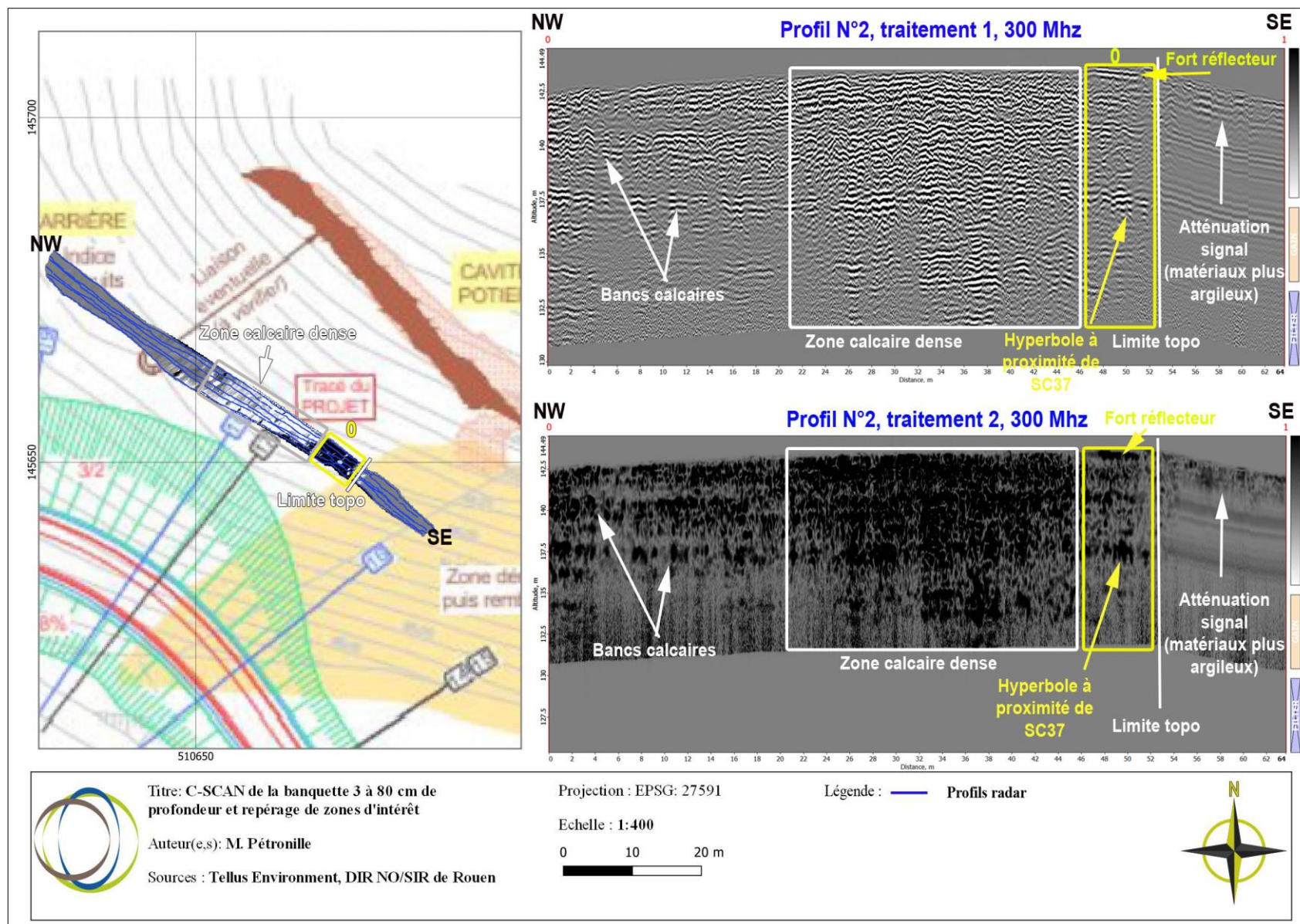


Figure 19 : C-SCAN de la banquette 3 à 80 cm de profondeur et repérage de zones d'intérêt – Exemple du profil radar N°2 à 300 Mhz.

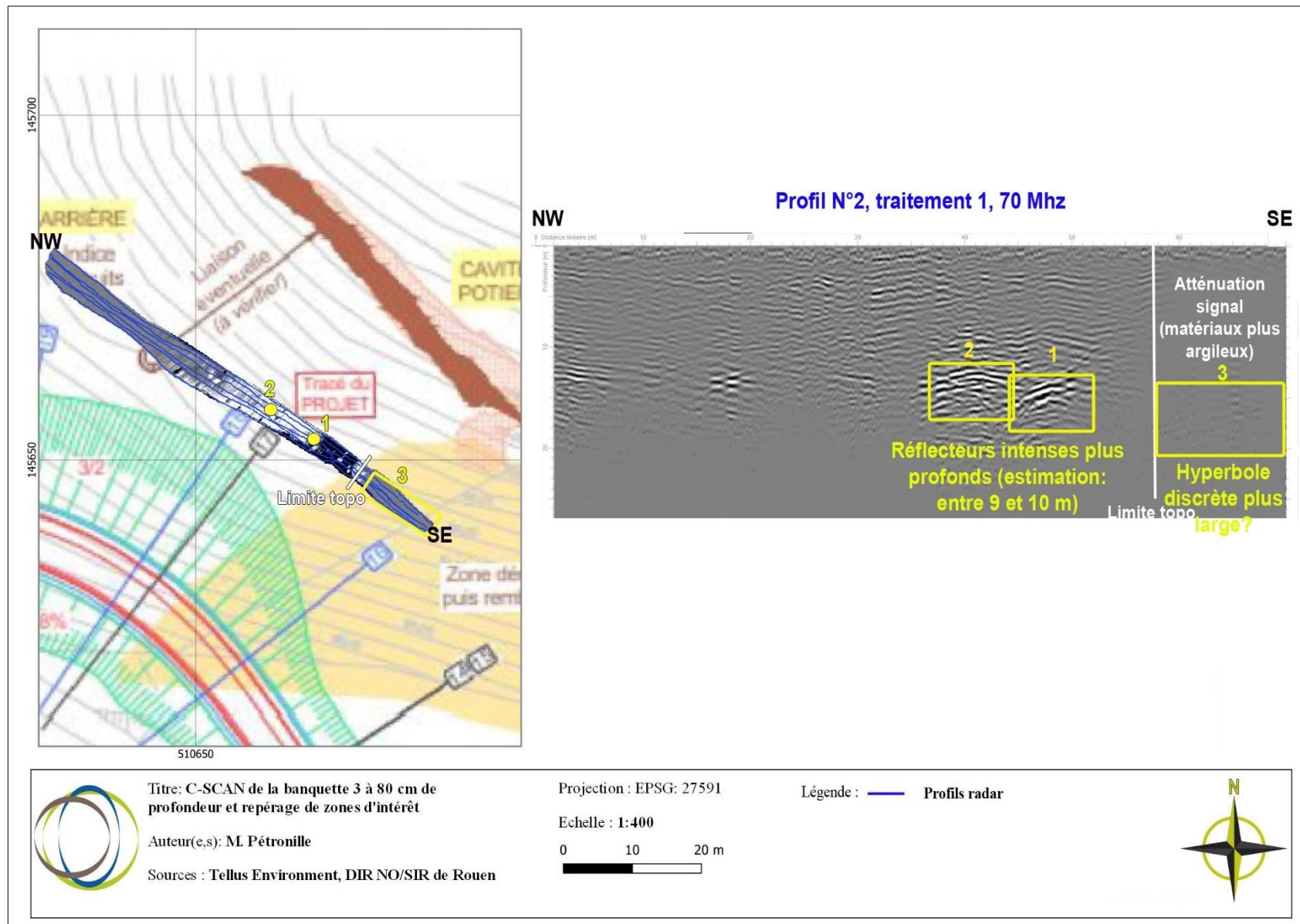


Figure 20 : C-SCAN de la banquette 3 à 80 cm de profondeur et repérage de zones d'intérêt – Exemple du profil radar N°2 à 70 Mhz.

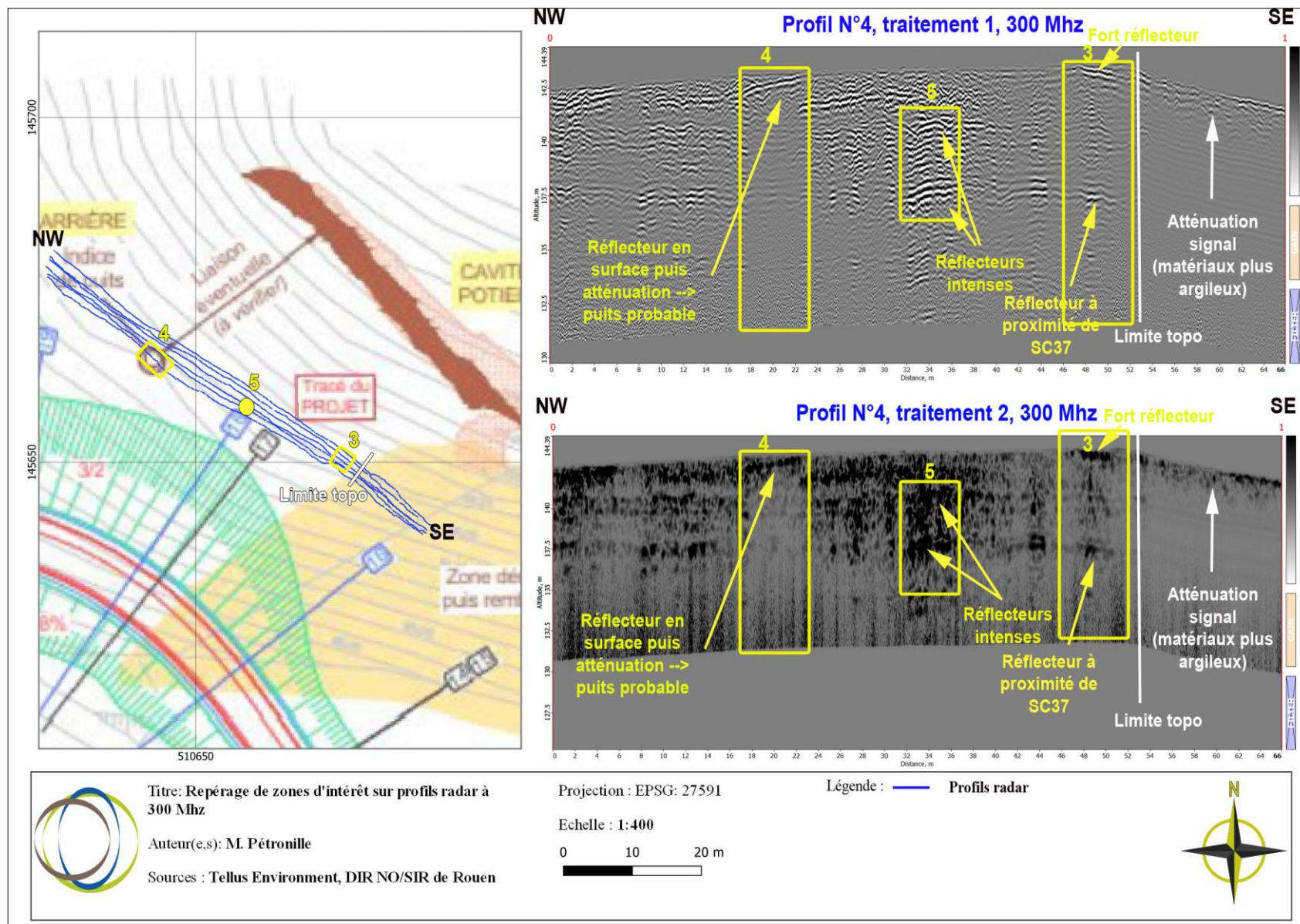


Figure 21: Repérage de zones d'intérêt sur le profil radar N°4 à 300 Mhz.

- Banquette 2 : comme pour la banquette 3, les B-SCAN à 300 Mhz montrent la présence de bancs calcaires entrecoupés de sédiments plus argileux, surtout dans la moitié Ouest des profils radar. Au sein de cette moitié Ouest, une zone particulière se détache (notée 1 sur Figures 22 et 23). Sur le profil N°8, quelques petites hyperboles se situent dans une zone interrompant les bancs calcaires. Sur le profil N°9, les hyperboles ont disparu, laissant la place à une zone caractérisée par une forte atténuation du signal. Peut-être s'agit-il d'une cavité ou d'un puits comme sur la banquette 3.

Comme pour la banquette 3, une hyperbole située à environ 4,5 m de profondeur précède la zone à l'Est caractérisée par une forte atténuation du signal (zone de remblai). Cette hyperbole isolée (notée 2 sur Figures 22 et 23), située dans le prolongement de celle de la banquette 3, pourrait peut-être correspondre à une cavité.

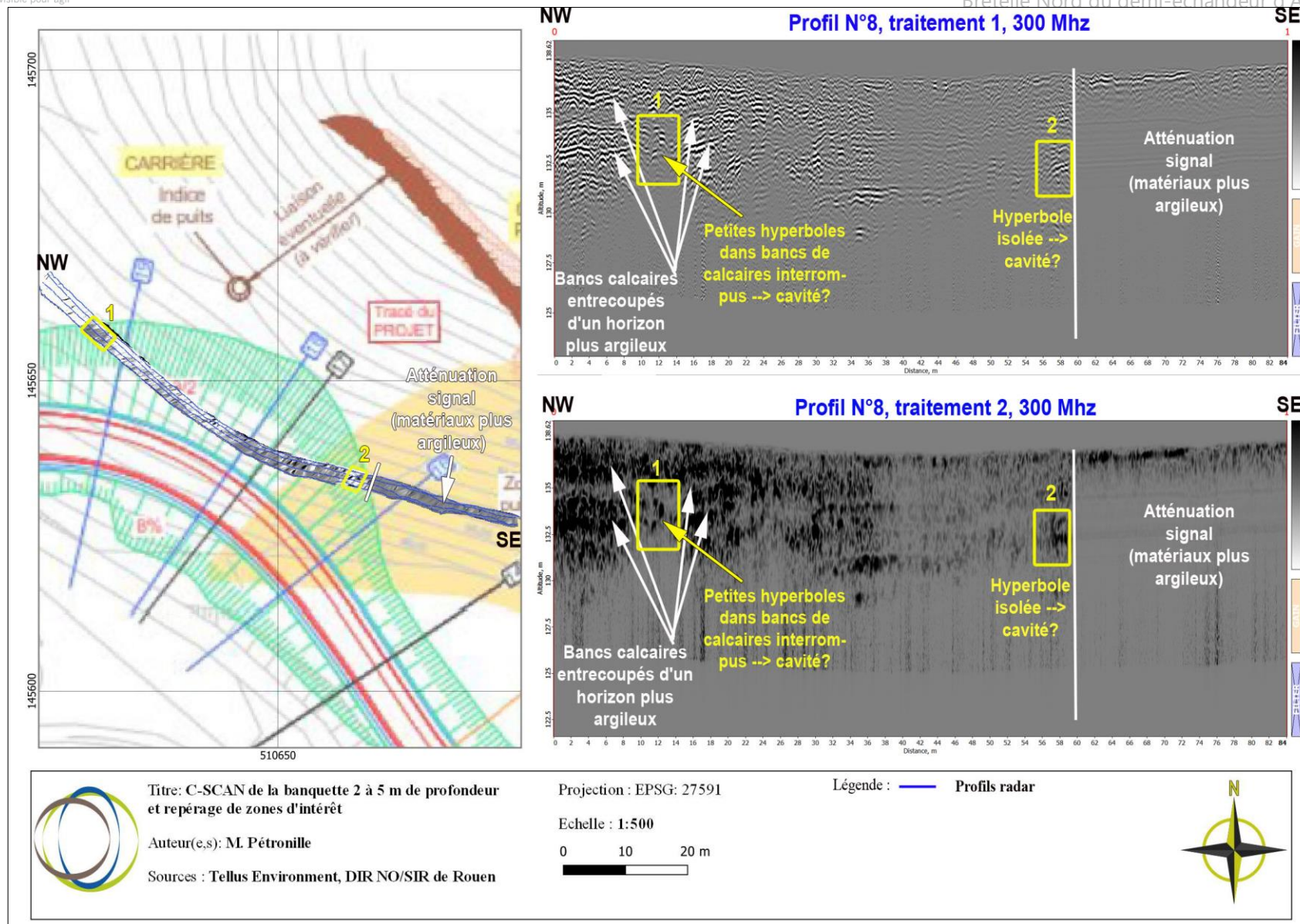


Figure 22 : C-SCAN de la banquette 2 à 5 m de profondeur et repérage de zones d'intérêt – Exemple du profil radar N°8 à 300 Mhz.

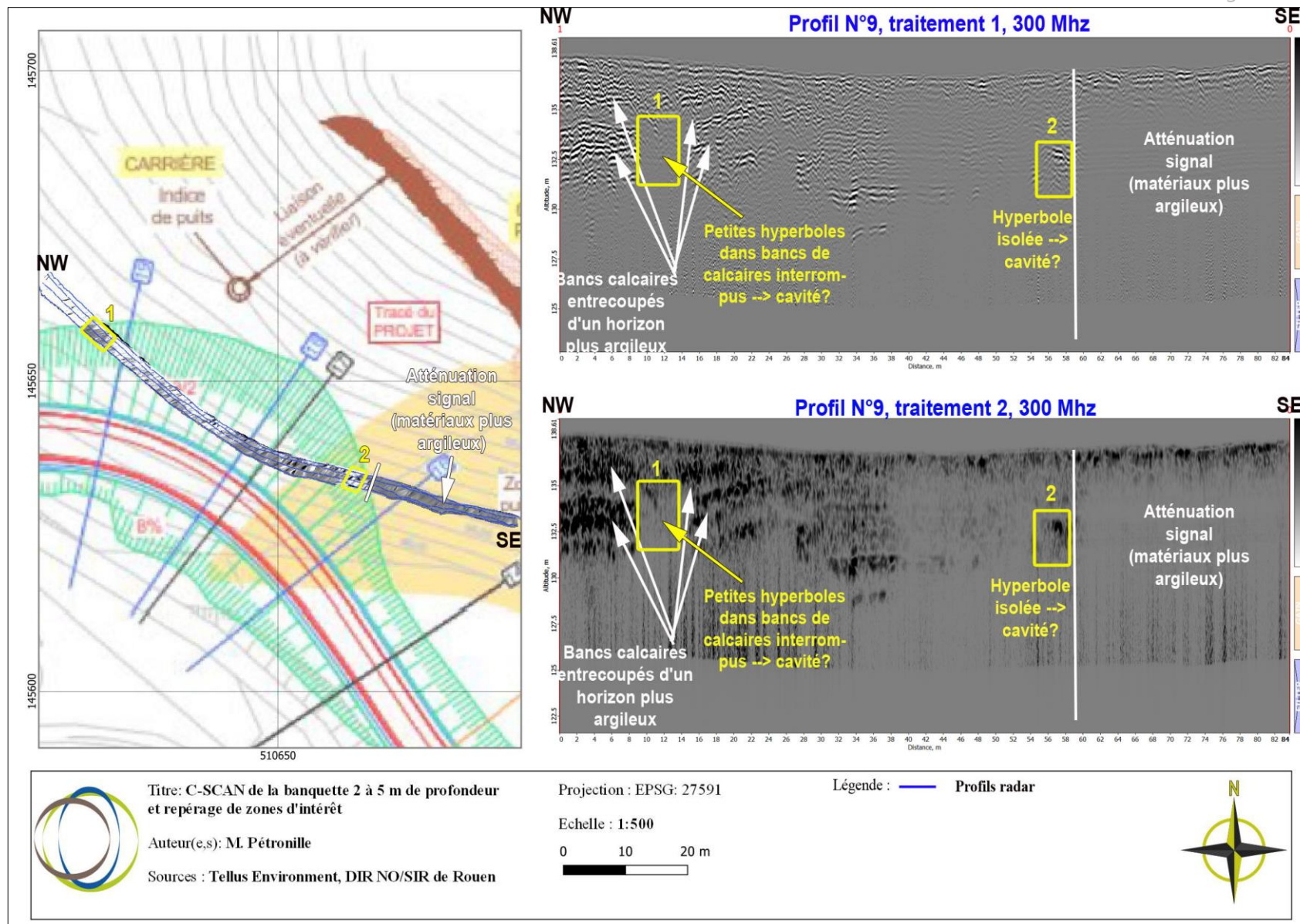


Figure 23: C-SCAN de la banquette 2 à 5 m de profondeur et repérage de zones d'intérêt – Exemple du profil radar N°9 à 300 Mhz.

- Banquette 1 : les B-SCAN à 300 Mhz obtenus pour la banquette 1 sont du même type que ceux obtenus pour la banquette 2. Ils montrent la présence de bancs calcaires entrecoupés de sédiments plus argileux, surtout dans la moitié Ouest des profils radar. Au sein de cette moitié Ouest, une zone particulière se détache (notée 1 sur Figure 24). Cette zone est caractérisée par une forte atténuation du signal sur une largeur d'un peu moins de 2 m et est bordée d'hyperboles intenses, particulièrement bien visibles sur sa bordure ouest. Il en est de même pour la zone notée 3, sauf que celle-ci est plus large (environ 4 m). Peut-être s'agit-il de puits comme sur la banquette 3.

Un peu plus à l'Est, une hyperbole isolée, située à environ 5 m de profondeur, est visible (notée 2 sur Figure 24). Nous notons que le banc calcaire situé au-dessus fait une cuvette au droit de cette hyperbole. Cette dernière correspond peut-être à une cavité.

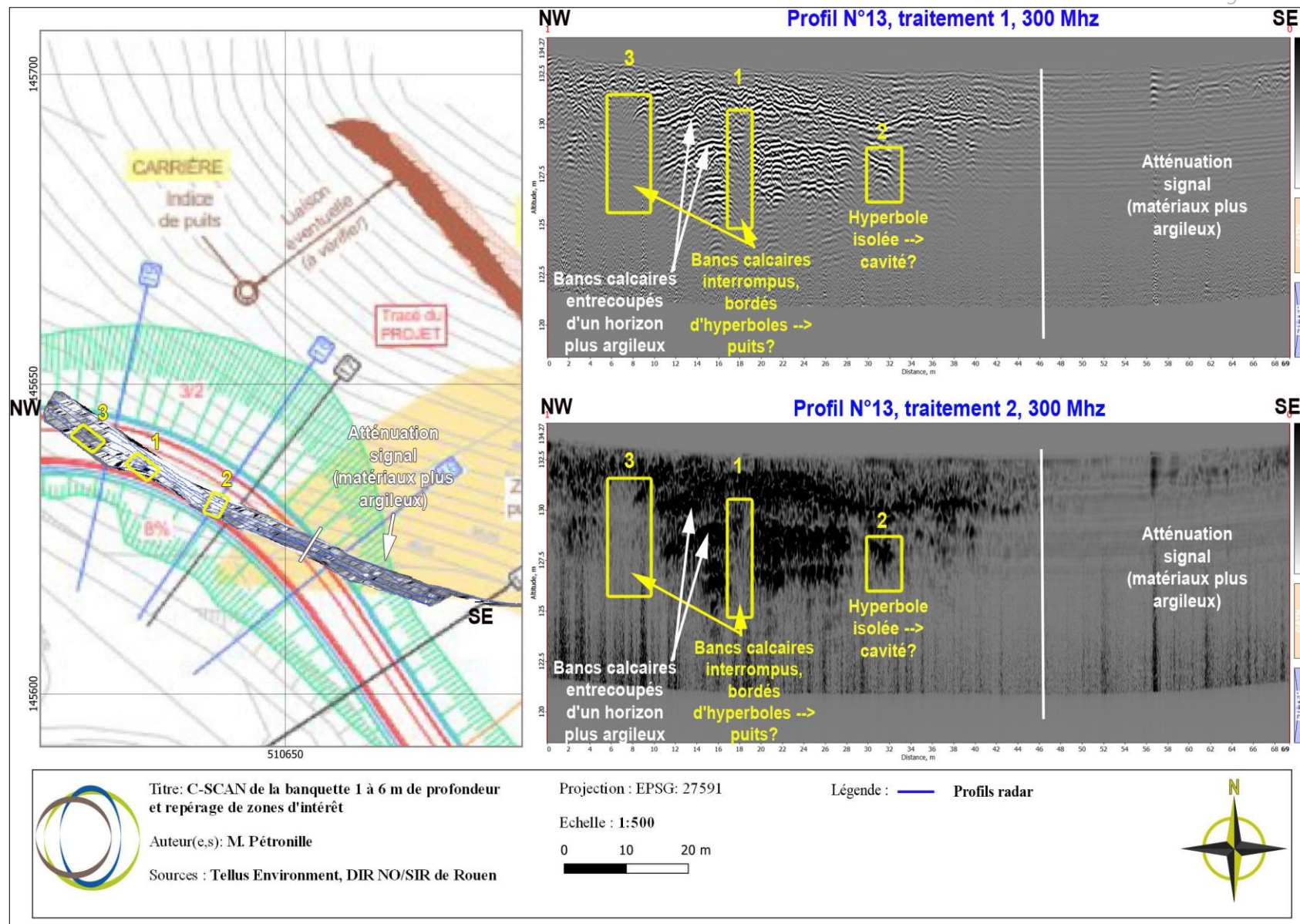


Figure 24 : C-SCAN de la banquette 1 à 6 m de profondeur et repérage de zones d'intérêt – Exemple du profil radar N°13 à 300 Mhz.

- Banquette 0 : les B-SCAN obtenus pour la banquette 0 sur l'ensemble des profils effectués montrent une atténuation du signal rapidement (aux environs d'1 m de profondeur), sur toute leur longueur (Figure 25). Les C-SCAN obtenus ne sont pas exploitables étant donné la faible pénétration des ondes. Seules quelques petites hyperboles sub-superficielles sont observables sur les profils et sont interprétées comme correspondant à des matériaux issus de remblais sur cette zone.

Les mesures radar effectuées sur cette banquette ne sont donc pas exploitables en termes de recherche de cavités.

Le bilan des zones d'intérêt retenues suite aux mesures radar sur le site d'étude est présenté sur la Figure 26.

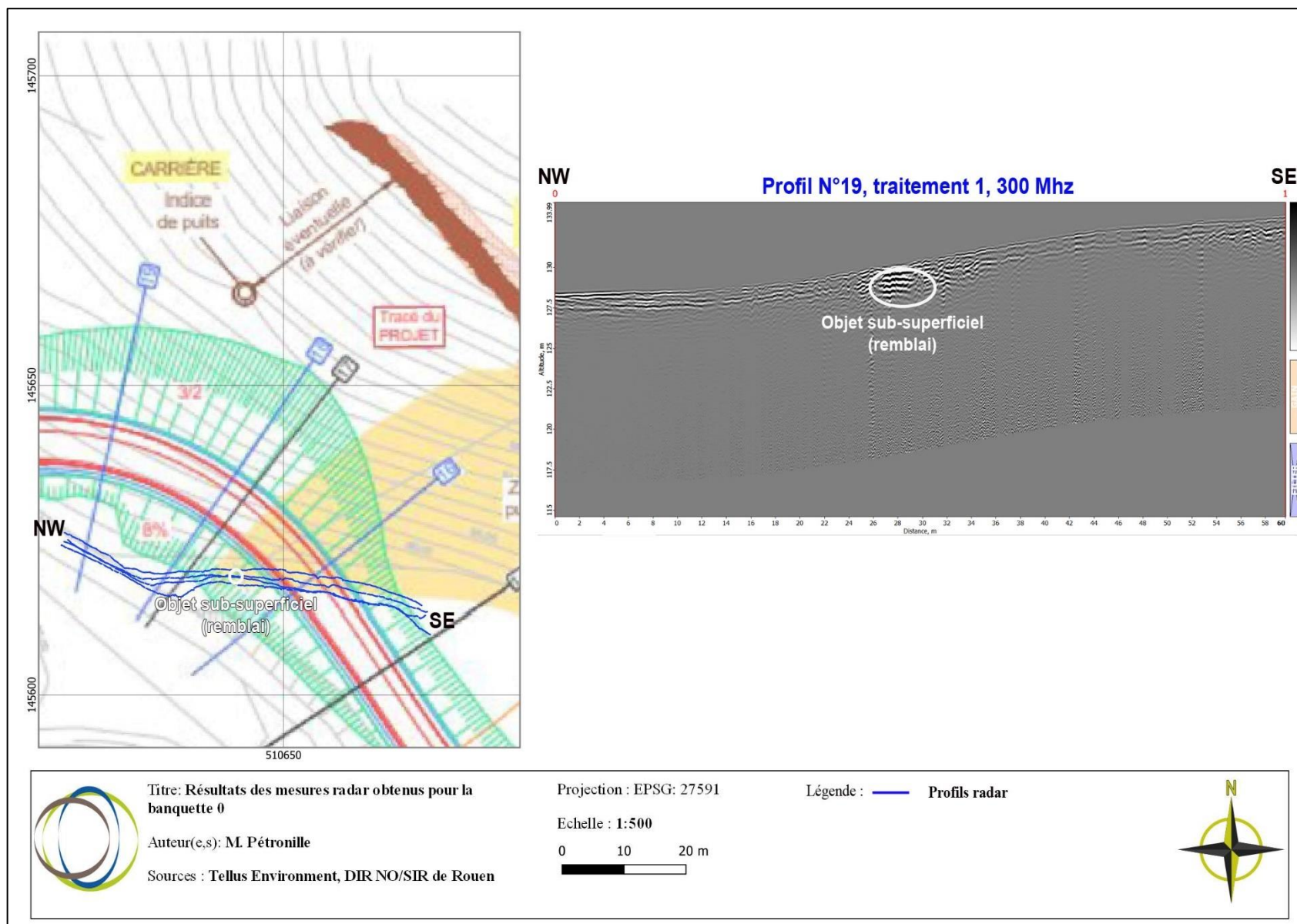


Figure 25 : Résultats des mesures radar obtenus pour la banquette 0.

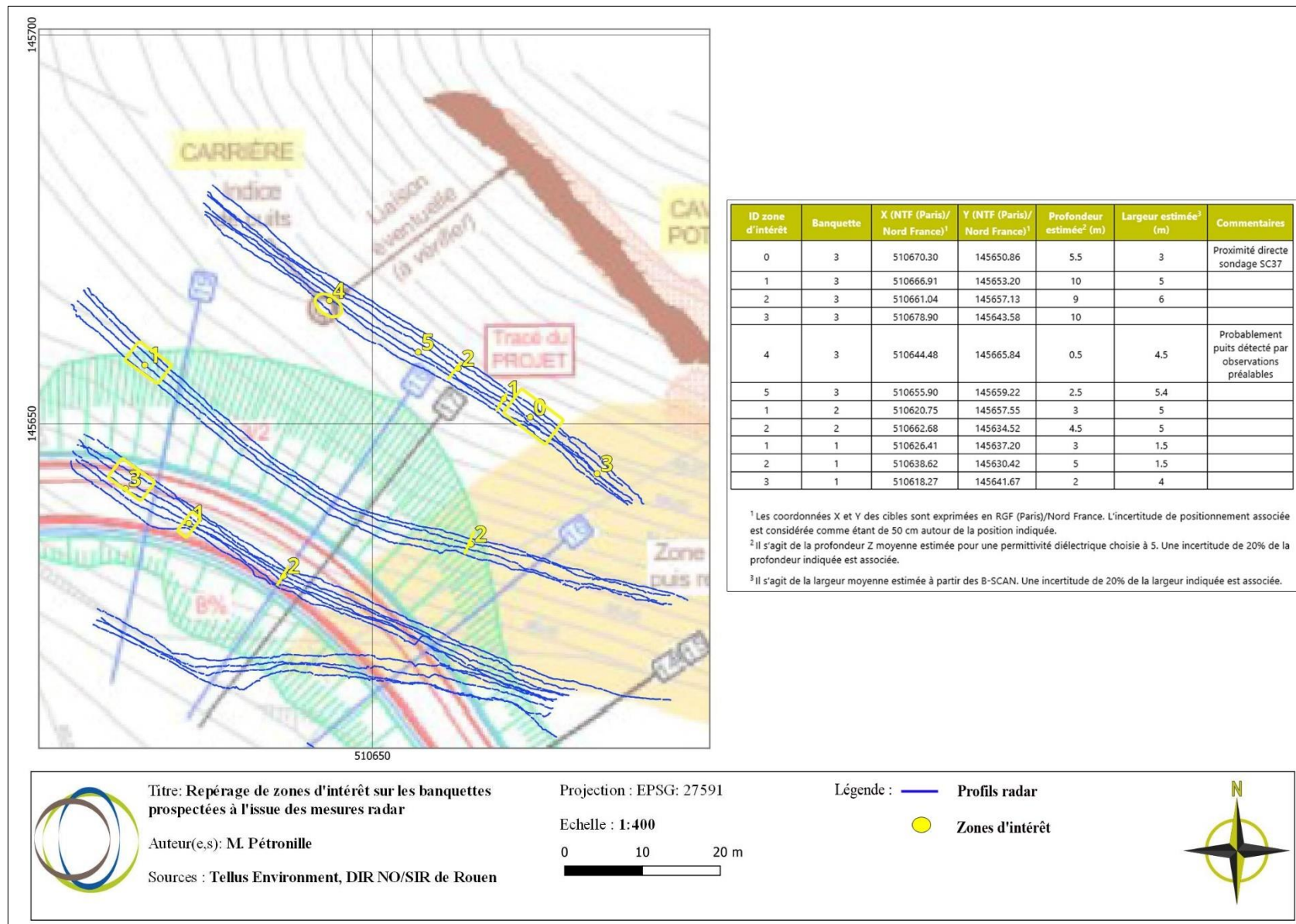


Figure 26.: Repérage de zones d'intérêt sur les banquettes prospectées à l'issue des mesures radar.

5.4.3. Mesures microgravimétriques

Les données issues des mesures microgravimétriques ont été traitées banquette par banquette, mais les résultats sont représentés de manière globale afin d'avoir une vue d'ensemble. Elles sont de bonne qualité, avec une bonne redondance lors des reprises. Cependant, il est évident que l'espace dédié aux mesurex est très restreint sur chacune des banquettes, ce qui limite nécessairement une plus grande vue d'ensemble des résultats.

Après avoir effectué toutes les corrections décrites au paragraphe 5.3.3, l'anomalie résiduelle a été calculée pour chacune des banquettes (Figure 27). Nous recherchons des cavités, donc des anomalies négatives.

La carte globale de l'anomalie résiduelle montre un certain nombre d'anomalies négatives, d'intensité variable :

- L'anomalie négative notée 1, située à l'Est de la banquette 3, est la plus intense. Le nombre de stations de mesure n'a pas pu être important dans la pente Est de la banquette 3 du fait de la configuration du terrain, mais nous avons au moins 3 mesures de part et d'autre du même ordre de grandeur, ce qui confirme la présence d'un défaut de masse localement. L'estimation de la profondeur de ce vide, via la formule pour un cylindre horizontal (la profondeur estimée est égale à la largeur à mi-hauteur de l'anomalie), est de l'ordre de 10 m, ce qui est cohérent avec les vides rencontrés sur SC37 et SP38. La partie de l'anomalie la plus négative se situe autour du point 1 de la Figure 27, à l'extérieur de la bordure ouest de la zone déminée/remblayée ;
- Le probable puits indiqué sur le plan fourni n'est pas détecté par les mesures, le nombre de points dans la zone considérée n'étant pas suffisante ;
- L'anomalie négative notée 2, située à l'Ouest de la banquette 2, est intense mais ponctuelle (largeur de l'ordre de 4 m pour une profondeur estimée à 2,5 m) ;
- Les anomalies négatives 3 (banquette 2) et 5 (banquette 1) sont du même ordre de grandeur d'un point de vue de leur intensité. L'anomalie 5 apparaît seulement comme étant moins profonde. Il pourrait s'agir de zones décomprimées liées à la zone déminée/remblayée, voire même de zones en lien avec l'anomalie 1 de la banquette 3 ;
- L'anomalie 4 correspond à une petite anomalie négative ponctuelle, qui pourrait peut-être être dans l'alignement de l'anomalie 2.

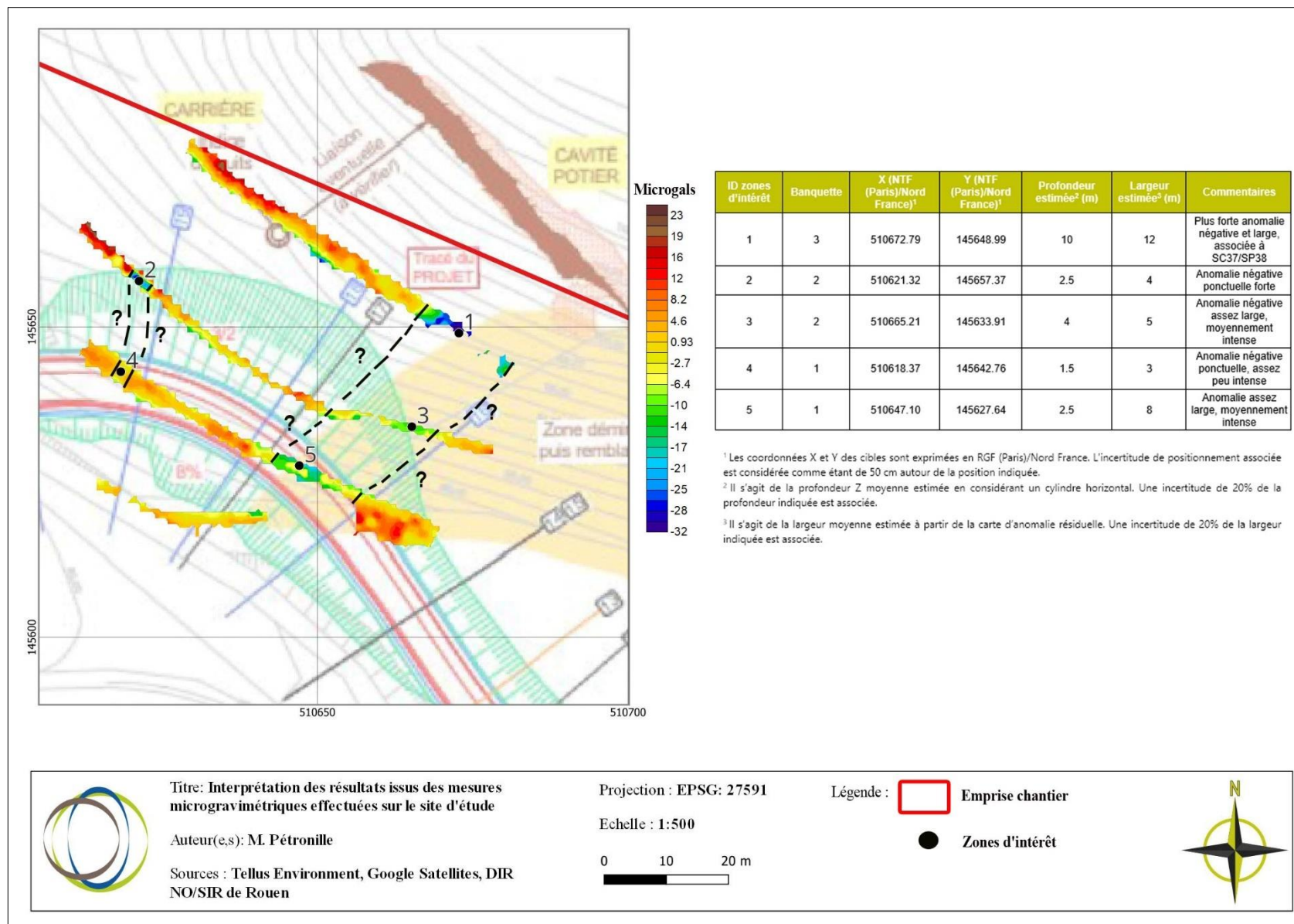


Figure 27.: Interprétation des résultats issus des mesures microgravimétriques effectuées sur le site d'étude.

6. REPONSES AU BESOIN DU CLIENT

La société TELLUS ENVIRONNEMENT a été mandatée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Normandie (DREAL Normandie) afin de détecter d'éventuelles cavités souterraines susceptibles de renfermer des munitions non-explosées dans l'emprise concernant la création de la bretelle Nord du demi-échangeur d'Arnières-sur-Iton (27). Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de la déviation Sud-Ouest d'Evreux (DSOE) qui constitue la dernière section du projet de déviation de l'agglomération ébroïcienne (27),

La particularité du site d'étude réside dans la présence, au Nord de la colline actuelle, de la carrière Potier. Cette dernière, correspondant à une cavité naturelle ayant servi à l'extraction de craie à la fin du Moyen-Âge, est composée de deux galeries :

- La galerie principale d'axe approximatif NS-SW et perpendiculaire au versant est longue de 50 m, large de 5 m et haute de 6 à 8 m ;
- Une petite galerie secondaire située à 15 m de l'entrée à gauche est visible sur 10 m de long, 5 m de large et 3 m maximum de haut.

Au cours de sondages géotechniques réalisés en 2023 au Nord de la colline, des vides ont été détectés entre 8,5 et 10 m de profondeur, attestant la présence d'une galerie/cavité, possiblement en lien avec la carrière Potier. Qui plus est, l'EHTPP menée sur le site indique que l'emprise d'étude présente un risque de pollution pyrotechnique avéré et donc élevé associé à la présence de cavités/galeries souterraines ayant servi de dépôt de munitions pendant la Seconde Guerre Mondiale, *a priori* plutôt en partie Nord. Ce risque est confirmé par la découverte successive de munitions, depuis les années 1970 jusqu'en 2023.

Afin de sécuriser les travaux de la future déviation, TELLUS ENVIRONNEMENT a dirigé son étude en 2 phases, conformément au CCTP : le terrassement de banquettes en Phase 1, suivi de mesures géophysiques en Phase 2.

Au cours de la Phase 1, 3 banquettes d'une longueur variant de 60 à 87 m de long et de 2 à 6,5 m de large ont été terrassées sur une épaisseur moyenne de 50 cm, voire 1 m maximum pour la banquette du haut (banquette 3). La partie basse de la colline a été considérée en l'état comme une quatrième banquette potentielle.

Une fois les banquettes terrassées, les investigations géophysiques ont débuté. Trois types de mesures ont été effectuées : des mesures magnétiques dont le but est de détecter des objets ferromagnétiques, dont des munitions non-explosées, puis des mesures radar et microgravimétriques afin de détecter la présence de vides potentiels et leur profondeur.

Les données acquises sont de bonne qualité pour les 3 types de mesures. Idéalement, il aurait fallu bénéficier de surfaces planes plus grandes pour améliorer notre vision globale des structures sous-jacentes sur le site d'étude. Afin de garantir au mieux des données exploitables, les mesures géophysiques ont été maximisées sur les banquettes, voire également en dehors pour les mesures magnétiques. Leur concaténation a permis de mettre en évidence six zones d'intérêt quant au besoin du client (synthèse en Figure 28) :

- La zone A : située à l'Est de la banquette 3 (du haut), il s'agit de la zone à plus forte probabilité de cavité car des anomalies concordantes issues des 3 méthodes employées sont détectées. La plus grosse anomalie microgravimétrique du site (-30 μ gal) y est observée, avec une profondeur évaluée aux environs de 10 m. Qui plus est, cette zone intègre la position des sondages SC37/SP38 au droit desquels des vides (et munitions pour SC37) ont été trouvés entre 8,5 et 10 m de profondeur.
La zone A est potentiellement raccordée à la zone A', située quelques mètres plus à l'Est, mais le faible nombre de points de mesures dans cette zone ne permet pas de conclure de manière fiable. Il s'agit peut-être également d'une zone caractérisée par un défaut de masse en lien avec la zone ayant été déminée/remblayée ;
- La zone B : située plus à l'Ouest de la banquette 3, ses caractéristiques sont concordantes avec les indices de puits relevés lors d'observations antérieures à cette étude. Le puits, d'un diamètre estimé à 4,5 m environ, trouverait son toit à 50 cm de profondeur environ. Le lien de cette zone avec la carrière Potier n'a pas été établi, faute de mesures supplémentaires ;
- La zone C : située à l'Ouest de la banquette 2 (du milieu), ses caractéristiques pourraient être concordantes avec une petite cavité ou un puits de 4 à 5 m de diamètre maximum et dont le toit se situerait aux environs de 2,5-3 m de profondeur ;
- La zone D : située à l'Est de la banquette 2, ses caractéristiques pourraient être concordantes avec une zone décomprimée liée à la zone déminée/remblayée, ou être possiblement en lien avec la zone A de la banquette 3 ;
- La zone E : située à l'Ouest de la banquette 1, ses caractéristiques, comme celles de la zone C, pourraient être concordantes avec une petite cavité ou un puits de 3 m de diamètre environ et dont le toit se situerait aux environs de 4 m de profondeur ;
- La zone F : située plus à l'Est de la banquette 1, ses caractéristiques, comme celles de la zone E, pourraient être concordantes avec une zone décomprimée liée à la zone déminée/remblayée, ou être en lien avec les zones D et A.

La banquette du bas, notée 0, n'a pas mis en évidence de structures sous-jacentes particulières du fait de l'atténuation rapide des ondes radar et de la présence de remblais saturant le signal magnétique.

Afin de vérifier la nature des zones d'intérêt détectées, nous préconisons la réalisation de forages au droit des 6 zones évoquées précédemment, avec une priorité pour les anomalies les plus pertinentes, à savoir les zones A-A', B et C.

Il conviendrait également de vérifier 2 cibles magnétiques classées en risque pyrotechnique moyen (cibles 13 et 15, Figure 28).

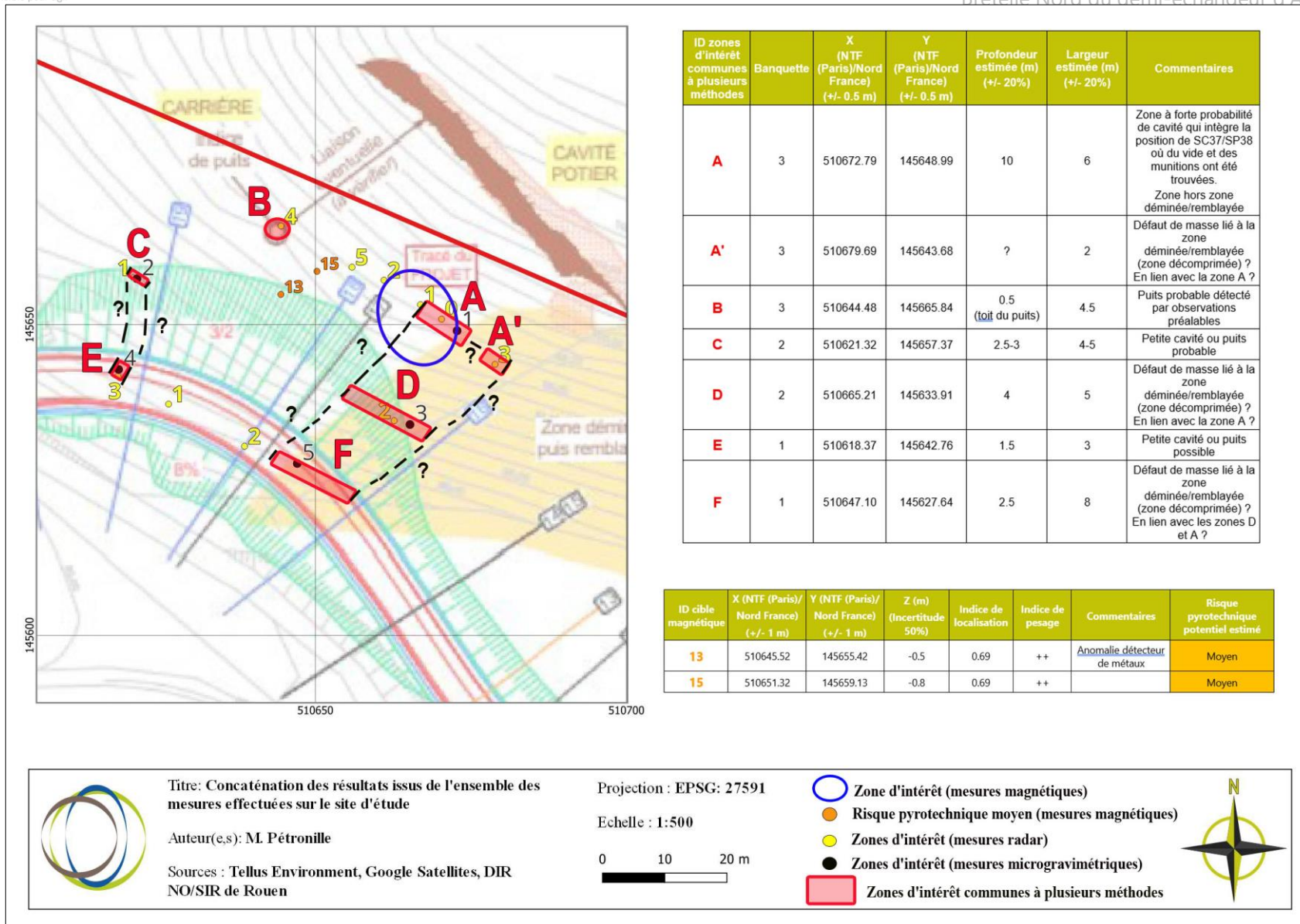
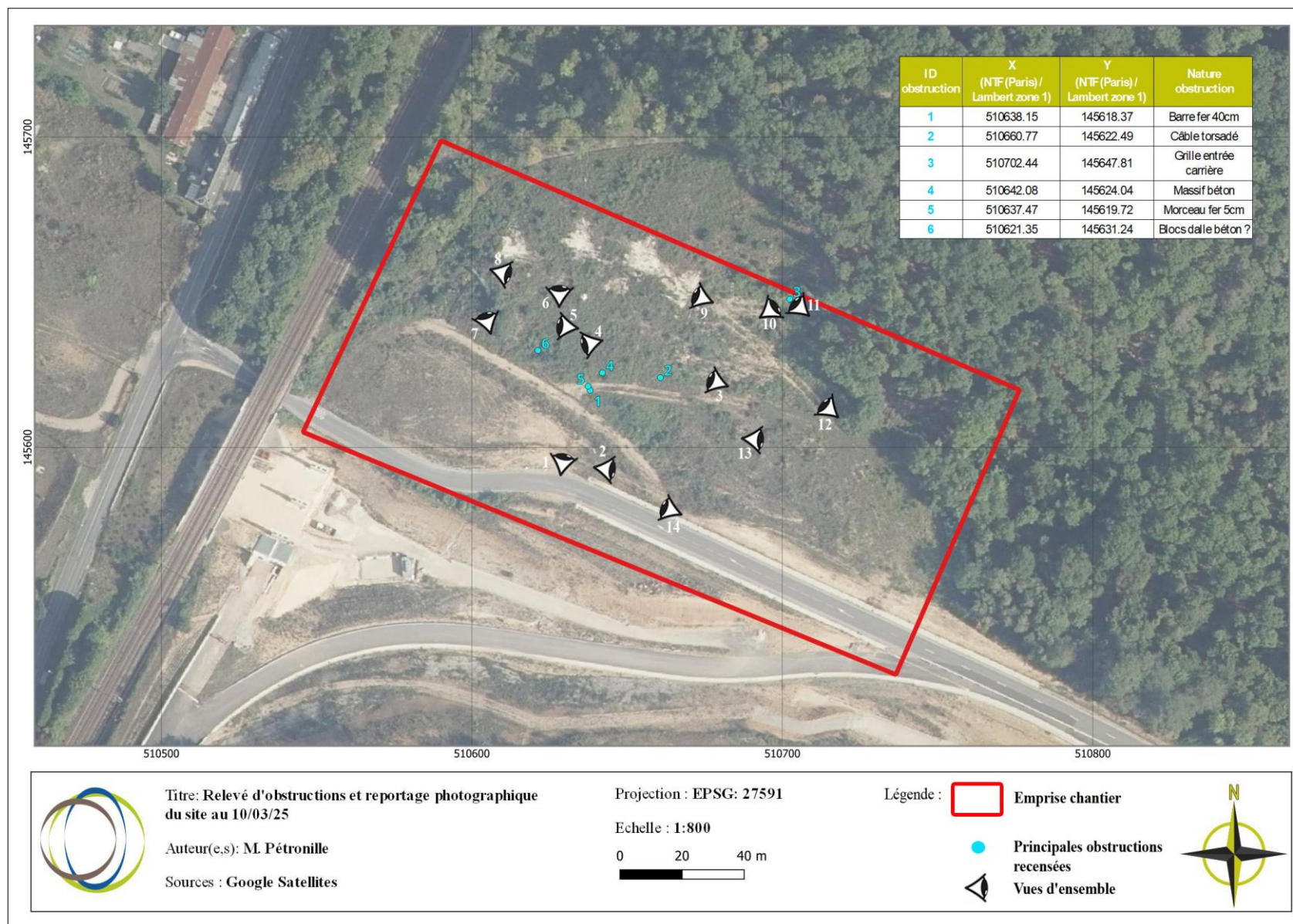


Figure 28.: Concaténation des résultats issus de l'ensemble des mesures effectuées sur le site d'étude.

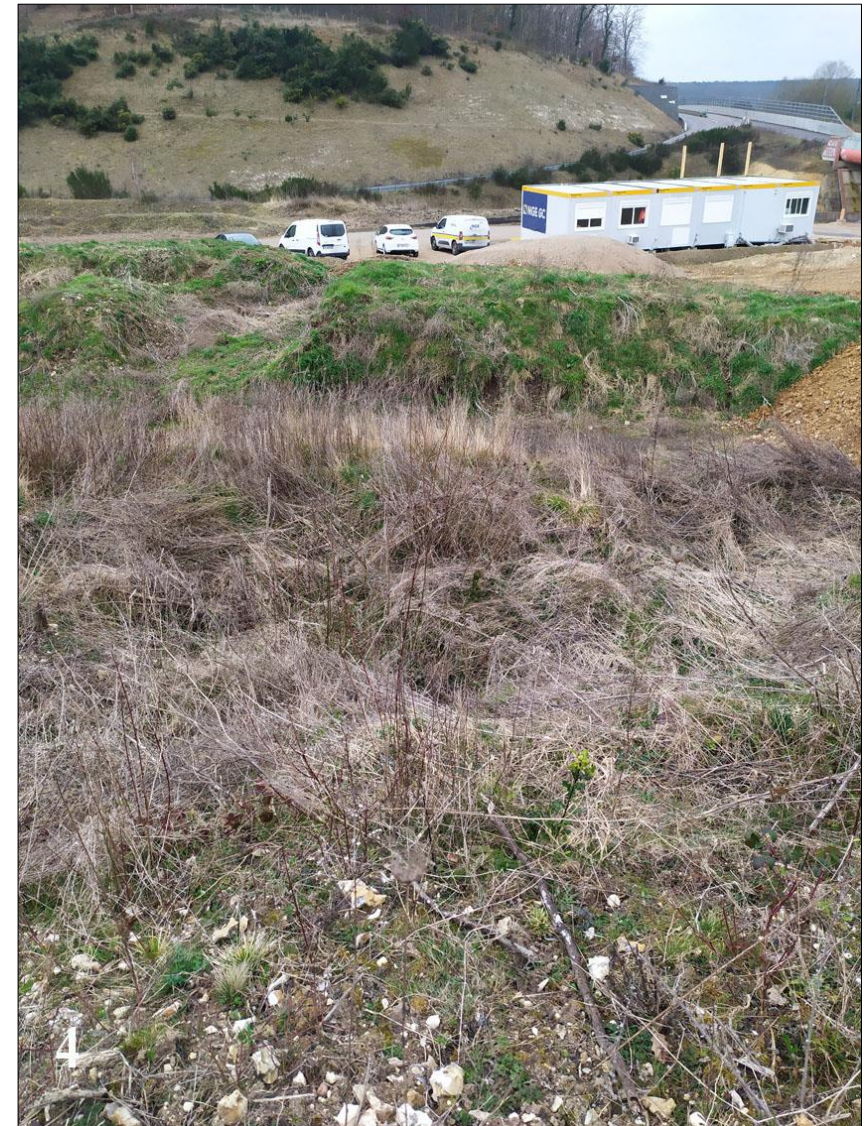


ANNEXES

ANNEXE 1 : RELEVÉ D'OBSTRUCTIONS ET REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE DU SITE AU 10/03/25

















ANNEXE 2 : MODE OPERATOIRE EN PHASE DE TERRASSEMENT

1/ Délimiter la zone qui doit être nivelée

Il s'agit de mettre en évidence l'espace de travail en positionnant un piquet au début et à la fin de chacune des banquettes à réaliser pour donner une direction. Il faut également déterminer une largeur pour les banquettes : elle est *a minima* de la taille de la lame de la mini-pelle (soit ici 2,5 m) et dépendra de la topographie locale et de la contrainte imposée par le CCTP d'un terrassement limité en profondeur (50 cm, voire jusqu'à 1 m pour la banquette du haut puisqu'elle est en principe la plus éloignée du risque cavité/détection de munitions). Plus les banquettes sont larges, mieux c'est.

2/ Evaluer la différence entre les hauteurs

Il s'agit d'évaluer la topographie moyenne du terrain (creux, bosses, pente).

3/ Mettre à niveau le terrain

Il s'agit d'aplanir au mieux le terrain, en comblant les creux et en arasant les bosses autour d'un niveau moyen plan. La mini-pelle creuse les reliefs positifs à l'aide du godet à dents et place les volumes de terre en trop dans le mini-dumper. Ce dernier déplace les déblais dans des zones de creux pour rééquilibrer la planitude de la banquette, ou ailleurs s'il y a un trop grand excès de terres.

4/ Nivelier le terrain

Le terrain est aplani à l'aide des chenilles de la mini-pelle et de sa lame.

ANNEXE 3 : MOYENS MATERIELS EN PHASE DE TERRASSEMENT

Mini-pelle Kubota U48-4



Fiche technique

poids	4.7 t	Longueur en transport	5.33 m
Largeur en transport	1.96 m	Hauteur en transport	2.55 m
Capacité du godet	0.12 m³	Largeur d` godet	0.6 m
Largeur chenilles caoutchouc	400 mm	Sécurité Conducteur	KbR
Max. Portée	5.85 m	Prof. de dragage	3.38 m
Force d'arrachement	33.6 kN	Série des modèles	U
Fabricant du moteur	Kubota	Type de moteur	V2607DI
Puissance moteur	33.8 kW	cylindrée	2.615 l
RPM au couple max	2200 rpm	nombre de cylindres	4

Mini-pelle Wacker Neuson ET90



Fiche technique

poids	8.72 t	Longueur en transport	7.12 m
Largeur en transport	2.25 m	Hauteur en transport	2.56 m
Largeur chenilles caoutchouc	450 mm	Flèche	MB
Max. Portée	7.18 m	Prof. de dragage	4.32 m
Force d'arrachement	46 kN	Série des modèles	ET
Fabricant du moteur	Perkins	Type de moteur	904J-E28T
Puissance moteur	55.4 kW	cylindrée	2.8 l
nombre de cylindres	4	Niveau d'émission	V

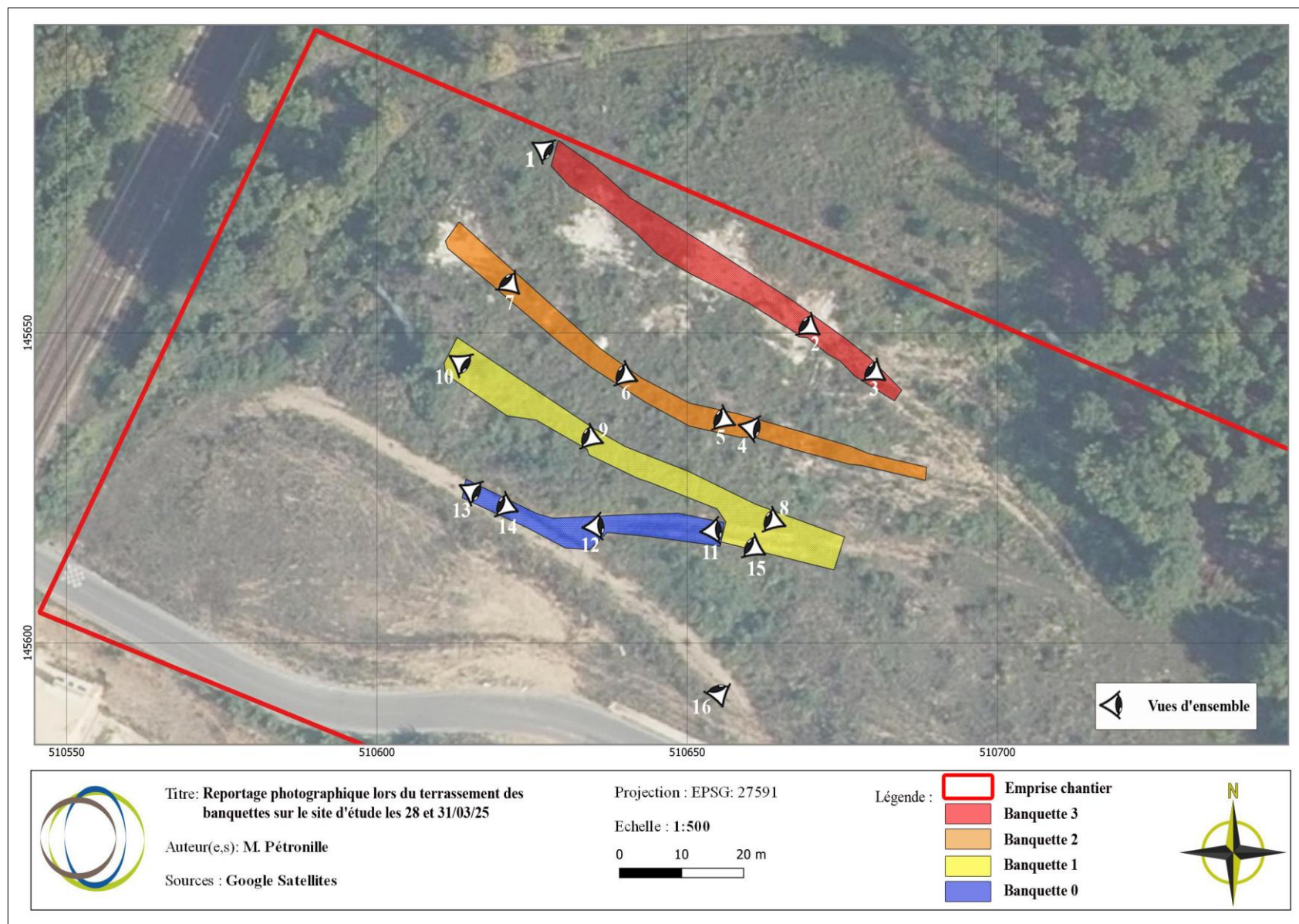
Mini-dumper Wacker Neuson 1001



Fiche technique

poids	1.23 t	Pneumatiques standard	10.00/75x15.3
Charge utile	1 t	Capacité benne	0.415 m³
Type de Tomberau	H	Longueur en transport	3 m
Largeur en transport	1.18 m	Hauteur en transport	2.58 m
Vitesse de déplacement	16 km/h	Rayon de braquage à l'extérieur	3.2 m
Fabricant du moteur	Yanmar	Type de moteur	3TNV76
Puissance moteur	17 kW	cylindrée	1.116 l
RPM au couple max	3000 rpm		

ANNEXE 4 : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE LORS DU TERRASSEMENT DES BANQUETTES SUR LE SITE D'ETUDE LES 28 ET 31/03/25





















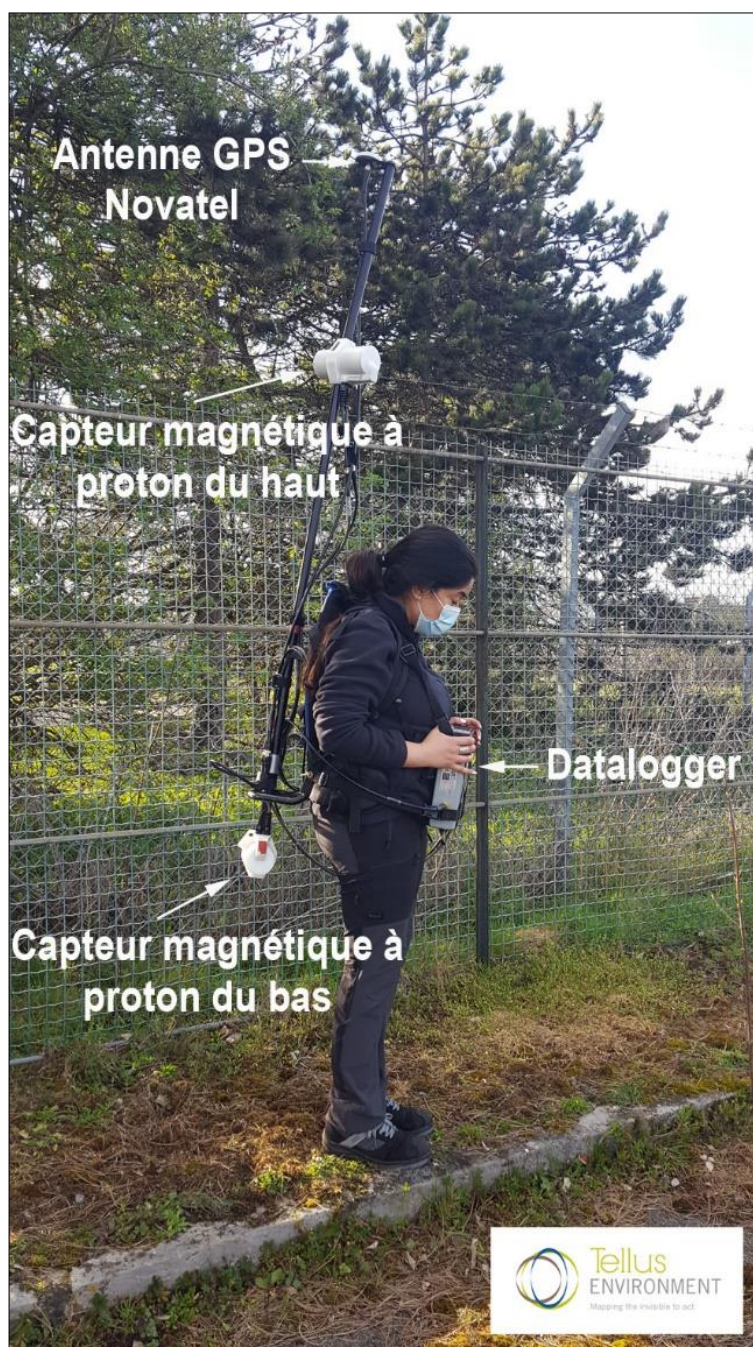




ANNEXE 5 : METHODE DE PROSPECTION MAGNETIQUE

Matériel TELLUS ENVIRONNEMENT

Magnétomètre à protons GSM19 (Sensys)



Fiche technique



Le GSM-19 est un magnétomètre à protons champ total. Grâce à sa technologie "overhauser" le GSM-19 est le magnétomètre/gradimètre de référence pour toutes les applications suivantes : exploration minière, caractérisation du sol (environnement et ingénierie), cartographie de pipeline, détection d'objets explosifs, archéologie, mesure en station magnétique, et prévention en volcanologie...

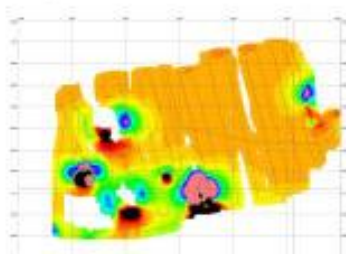
CARACTERISTIQUES DU GSM-19
Version gradiomètre
Version "walking" grad & mag
Version Fast reading pour le Grad. Et le Mag
Option VLF
Option GPS



L'effet "overhauser" décuple la sensibilité du magnétomètre à protons standard. Les résultats obtenus sont de très bonne qualité avec une sensibilité de 0.015 nT/√Hz à 1 échantillon par seconde au moins. La résolution du GSM-19 est de 0.01 nT.

Le pas d'échantillonnage du GSM-19 est défini selon **trois modes de lecture** : mode "standard" 3 sec, mode "walking" 0.5 sec et mode "fast" 0.2 sec.

Le GSM-19 est également doté d'une technicité importante pour l'utilisateur : il s'agit de "la tolérance du gradient". Le procédé de fabrication "overhauser" permet au GSM-19 d'obtenir des **mesures fiables** même en présence de variations de champs magnétiques extrêmes. La tolérance magnétique du système est de 10.000 nT par mètre)



Visualisation des résultats et projection des passages sur Google Earth.

Protocole de mesures général

Une fois le magnétomètre monté (capteurs, GPS, datalogger), le datalogger est allumé. Une synchronisation UTC est faite. Les paramètres de prise de mesure sont choisis : type de mesure, fréquence d'échantillonnage, filtrage des mesures, espacement inter-capteurs.

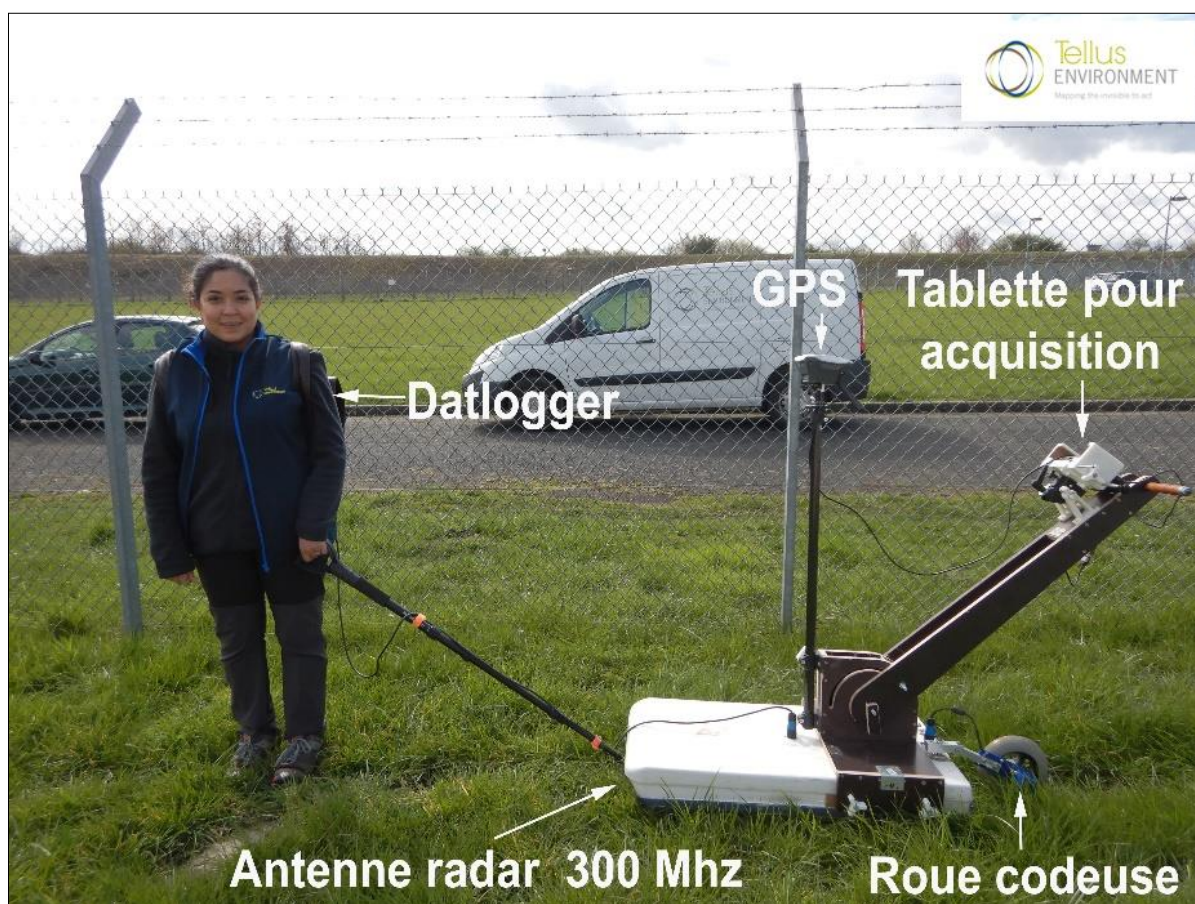
Chacune des banquettes mises en place est prospectée en réalisant des profils pédestres en aller-retour espacés de 1 m.

Une fois les mesures terminées, les données géoréférencées sont exportées quotidiennement du datalogger vers un PC et sont sauvegardées avant d'être traitées puis interprétées.

ANNEXE 6 : METHODE DE PROSPECTION RADAR

Matériel TELLUS ENVIRONMENT

Radar Zond 12^e (Radsys), antenne 300 Mhz



Fiche technique



RADAR
Systems, Inc.

THE BEST GPR DATA QUALITY AT THE BEST PRICE!

www.radsys.lv

General Purpose Pulse GPR ZOND-12e

SINGLE CHANNEL OR ADVANCED CONTROL UNITS



ZOND 12e GPR is a portable digital Ground Penetrating Radar carried by a single operator. The unit is manufacturing in **SINGLE CHANNEL** or **ADVANCED** performance. It is designed for solving a broad range of geotechnical, geological, environmental, engineering and other tasks for nondestructive environmental monitoring.

System Advantages

- Selectable time range from 1 ns to 2000 ns with 1 ns step
- 320/160/80/40 scans per second in ADVANCED performance
- 56 scans per second in SINGLE CHANNEL performance
- 1024/512/256/128 samples per scan in ADVANCED performance with 16 bit resolution
- 512 samples per scan in SINGLE CHANNEL performance with 16 bit resolution
- Selectable hardware and software filters
- Up to 10 points of digital gain function
- Data transfer through Ethernet or Wi-Fi
- Data acquisition in original shape
- Small power consumption (up to 12 h of the field work per one charging)







Darzauglu str. 1-105, Riga, Latvia, LV1012
+371 67141041
radsys@radsys.lv
www.radsys.lv

G R O U N D P E N E T R A T I N G R A D A R S

Protocole de mesures général

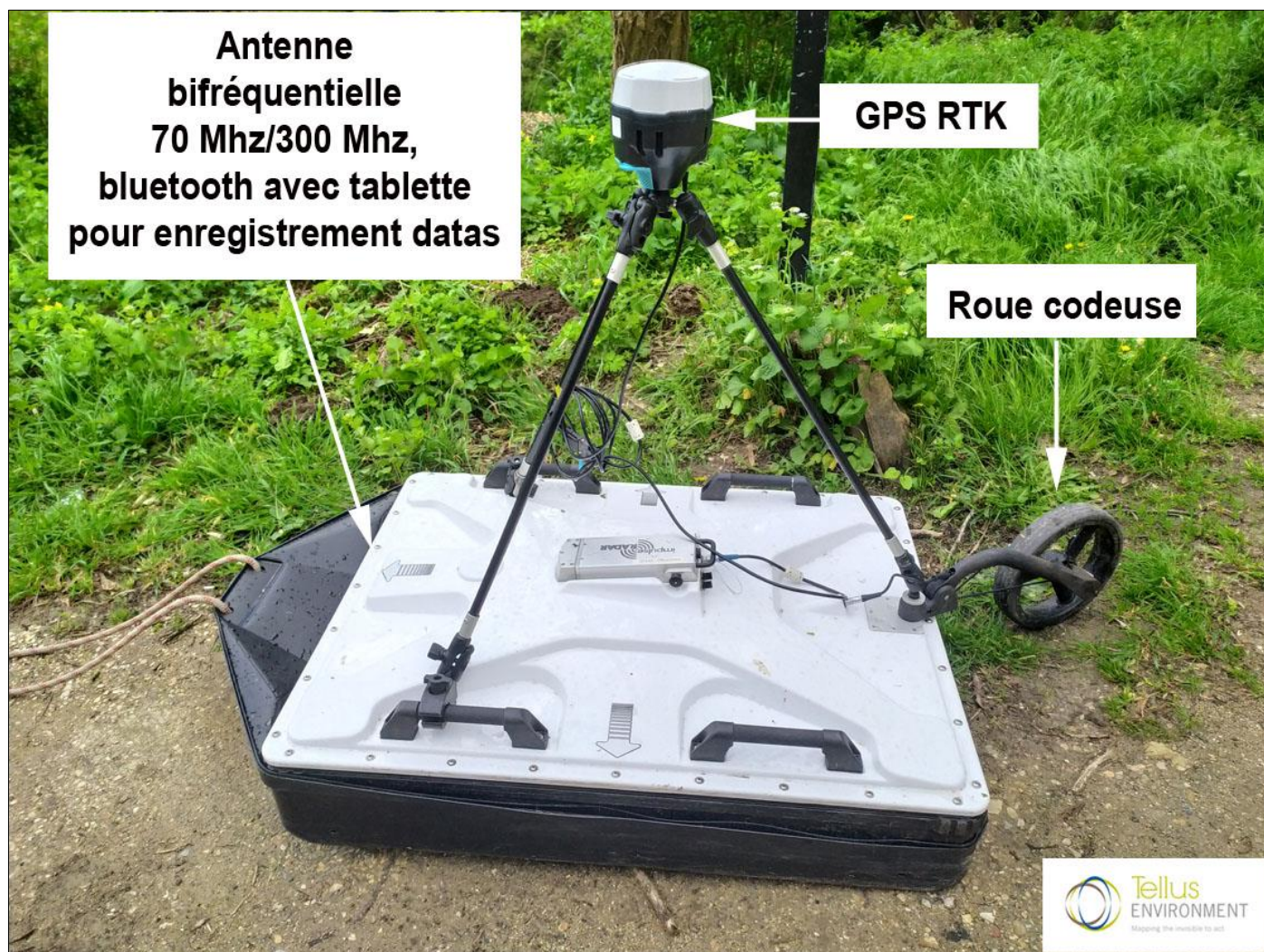
Une fois le radar monté (GPS, roue codeuse, tablette d'acquisition), l'unité d'acquisition est allumée ainsi que la tablette. Les paramètres de prise de mesure sont choisis : temps d'enregistrement, validation du pulse delay, filtrage des données en temps réel.

Chacune des banquettes mises en place est prospectée en réalisant des profils pédestres en aller-retour espacés de 1 m.

Une fois les mesures terminées, les données géoréférencées sont exportées quotidiennement et sont sauvegardées avant d'être traitées puis interprétées.

Matériel complémentaire

CrossOver CO730 (Impulse Radar)



Fiche technique

Une série de trois CrossOver



- Géoradar bi-fréquence.
- Echantillonnage en temps réel RTS (**hyper-stacking**).
- GPS métrique intégré.
- Connexion par Wifi.
- Tablette Android avec **ViewPoint App**.
- Logiciel de traitement **Cross-Point** (Windows).
- Autres fréquences sur demande.



Les **Cross-Over** sont basés sur la technologie d'échantillonnage en temps réel (**RTS**) augmentant la **qualité du signal**, la **profondeur d'investigation** et la vitesse d'acquisition par rapport au radar traditionnel. La double fréquence permet d'acquérir des données de bonne résolution avec l'antenne 300 MHz et des données en profondeur avec la 70 Mhz.

Principales applications

Prospection géologiques & environnementales
Détection de cavité

Le CO730 est disponible **uniquement en version tractée**. En version standard, il est fourni avec une roue codeuse et un kit de traction composé d'un plaque de protection, d'un harnais pour tirer plus facilement le radar. Le harnais intègre un support tablette permettant de visualiser les données tout en prospectant. **Un support GPS externe est disponible en option**. A noter qu'un déclenchement en temps est possible si l'utilisation de la roue codeuse n'est pas possible sur le terrain.

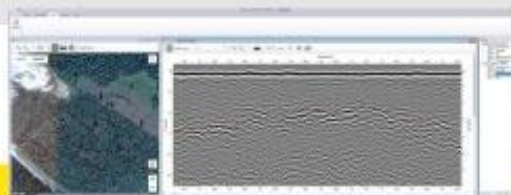


L'acquisition des données s'effectue avec **ViewPoint** disponible sur Android (tablette/téléphone) et le traitement avec le logiciel Windows **Cross-Point**. Les interfaces sont modernes, intuitives, spécialement conçues pour maximiser

PERFORMANCES TECHNIQUES

- Fréquences : **70 & 300 MHz**
- Déclenchement : distance, temps, manuel.
- Profondeur d'investigation* : **jusqu'à 20m**
- Echantillonnage en temps réel— technologie RTS
- Scans/sec : > 800
- Vitesse d'acquisition : 130 km/h @ 5cm entre les scans
- GPS métrique interne
- Connexion par câble au GPS externe
- Batterie rechargeable 12V Li-Ion ou externe 12V D.C (option)
- Autonomie : jusqu'à 6h sur batterie
- Dimensions antenne : 960 x 760 x 270 mm
- Poids : 20.2 kg avec batterie.

* dépendante du terrain ie. de la conductivité électrique



Protocole de mesures général

Une fois le radar monté (GPS, roue codeuse, tablette d'acquisition), l'unité d'acquisition est allumée ainsi que la tablette. Les paramètres de prise de mesure sont choisis : temps d'enregistrement, validation du pulse delay, filtrage des données en temps réel.

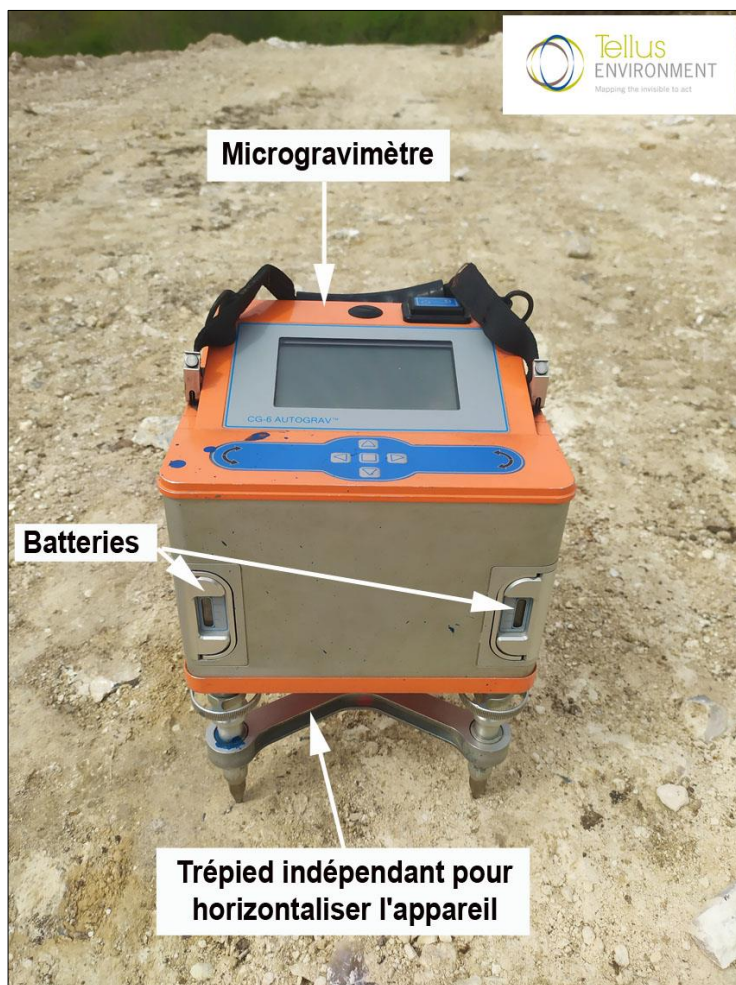
Chacune des banquettes mises en place est prospectée en réalisant des profils pédestres en aller-retour espacés de 1 m.

Une fois les mesures terminées, les données géoréférencées sont exportées quotidiennement et sont sauvegardées avant d'être traitées puis interprétées.

ANNEXE 7 : METHODE DE PROSPECTION MICROGRAVIMETRIQUE

Matériel

Microgravimètre CG-6 (Scintrex)



Fiche technique



Le gravimètre Scintrex CG-6 est un instrument de terrain géodétique capable de mesurer en tout point du globe la différence du champ de pesanteur entre deux points (gamme de mesure jusqu'à 8000 mGal) avec une résolution de 1 μ Gal et une répétabilité de 5 μ Gal.



CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Boîtier renforcé : le capteur du CG-6 est beaucoup moins sensible aux chocs.

Boîtier réduit de 30% : 21.5 (H) x 21 x 24 cm ;
Poids : 5.2 kg. Les mesures du CG-6 sont moins perturbées par le vent.

Nouvelle interface utilisateur plus conviviale.

Trépied repensé pour faciliter la mise à niveau : plus léger et plus solide, les vis millimétriques sont plus longues et les 2 vis de réglages de l'axe X se situent désormais devant.

Précision : 1 μ Gal.

Déviatoin standard : inférieur à 5 μ Gal.

Gamme de mesure : jusqu'à 8000 mGal.

Dérive journalière : entre 0,02 et 0.2 mGal/j. La dérive résiduelle a été nettement réduite.

Correction automatique : diurne, inclinaison, température, bruit sismique.

Écran LCD incliné pour faciliter la lecture.

Enregistrement des mesures (4Go).

Température de fonctionnement : -35°C à 45°C ou 55°C (option HT).

Connexion Bluetooth longue portée avec une tablette de terrain : lancement des mesures à distance, récupération des données, connexion à un GPS externe.

Batteries longue durée (24h à 25°C).

TABLETTE EXTERNE ET LOGICIEL TERRAIN

Le microgravimètre CG-6 est équipé d'une tablette externe permettant de lancer et contrôler les mesures à distance, de communiquer avec un GPS extérieur, et de réaliser l'ensemble des traitements automatiquement afin obtenir l'anomalie de Bouguer directement sur le terrain :

- Windows, Wifi, Bluetooth, GPS, 3G/4G, processeur Intel.
- Interface utilisateur pour la calibration de la dérive et de l'inclinaison lors de la mesure.
- **Calcul automatique de la carte de l'anomalie de Bouguer simple.**

SCINTREX
A DIVISION OF LRS



Protocole de mesures général

Un maillage est choisi afin de réaliser des mesures régulières au droit de stations, le long des zones à investiguer.

Pour chaque station, un relevé topographique et GPS est effectué, puis un cycle de mesure des variations du champ de pesanteur est effectué selon un temps d'intégration préalablement défini. A chaque mesure le gravimètre réalise un prétraitement de la valeur lue (moyennes de N mesures, déviation, rejets, filtrage du bruit sismique ambiant) ainsi qu'une correction automatique de l'inclinaison (appareil mis à l'horizontal via un trépied et des vis millimétriques) et de la température du capteur.

Toutes les heures, une mesure est effectuée sur la station définie comme étant la base et qui sert de référence pour le calcul de dérive de l'appareil. En principe, la base est choisie au centre de la surface à investiguer.

Les mesures doivent être réalisées dans un endroit calme. Si tel n'est pas le cas, il convient de réaliser les mesures à des horaires mieux adaptés à l'environnement du site (de nuit par exemple) ou de refaire la ou les mesure(s) qui ont été ponctuellement perturbées.

Une fois les mesures terminées, les données sont exportées quotidiennement et sont sauvegardées avant d'être traitées puis interprétées.

