

## ***Voir le tell submergé de Taraschina sous un autre angle : prospections géophysiques de surface et diagraphie***

*François LÉVÊQUE*

### **1. Introduction**

L'imagerie géophysique de la proche surface permet d'observer des objets présents sous la surface du sol, invisibles à l'œil, en un temps de prospection modeste. La qualité de la détermination de la géométrie des structures identifiées dépend d'une part du contraste de la propriété physique mesurée entre l'objet et l'encaissant et d'autre part de la densité spatiale des mesures réalisées.

L'objet d'étude, le tell de Taraschina, étant en zone humide, la proximité du toit de la nappe d'eau limite fortement la profondeur d'investigation des méthodes fondées sur la propagation d'un signal électrique ou électromagnétique. Les courants électriques empruntant alors le chemin le plus court, ils restent en surface de la nappe d'eau. En revanche, les méthodes magnétiques sont particulièrement bien adaptées à la présence de terre chauffée, voir cuite et sont par conséquent particulièrement bien appropriées à la problématique de ce site, spécifiquement dans ce contexte de zone humide. Les murs des maisons incendiées constituent des sources magnétiques de forte intensité, d'autant que la terre crue, utilisée en tant que matériaux de construction, est formée de sédiments prélevés à proximité.

Le fer, un des éléments majeurs, gouverne les propriétés magnétiques de la matière naturelle. Du fait des conditions physico-chimiques du milieu, le fer est présent dans les sédiments des zones humides de type deltaïque sous des formes minéralogiques peu magnétiques. L'omniprésence de l'eau et l'absence de l'oxygène qui en résulte sont les moteurs des transformations minéralogiques impliquant le fer. En effet, la porosité du sédiment étant saturée par l'eau, les échanges avec l'air, en particulier avec l'oxygène, sont limités.

L'oxygène libre présent dans le sédiment est rapidement consommé par des réactions d'oxydation, par exemple dans les processus de minéralisation de la matière organique (MO). Le milieu devient réducteur. Le fer est alors réduit, passant de fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) à fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Ce dernier a une solubilité élevée, favorisant son lessivage. Le changement de couleur du sédiment, passant d'un ton ocre-brun en surface à gris-bleu en profondeur, révèle cette évolution.

Si la teneur en MO est élevée, alors en l'absence d'oxygène disponible, le fer en solution s'associe au soufre libéré par la minéralisation de la MO. Ainsi se forment des sulfures de plus en plus riches en soufre jusqu'à la phase ultime, la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), qui n'est pas magnétique (paramagnétique). Une des phases transitoires précurseurs de la pyrite est la greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). Contrairement à la pyrite, la greigite est une phase magnétique (ferrimagnétique), apte à porter une aimantation en dehors de celle induite par le champ magnétique local, mais elle est métastable à l'air. Elle ne peut donc être présente que dans les sédiments organiques et disparaît si ces sédiments sont mis à l'air. Sa contribution doit donc être négligeable, du moins en surface. Dans la partie de battement de nappe, l'apport modéré d'oxygène favorise la formation de goethite ( $\text{FeOOH}$ ) un oxyhydroxide de fer ferrique, qui est un pigment de couleur jaune. Ce pigment (antiferromagnétique canté, c'est-à-dire avec les atomes de fer répartis dans deux sous réseaux cristallins avec des moments magnétiques imparfaitement anti-parallèles) possède une faible capacité à porter une aimantation permanente. En conséquence, les sédiments présents dans les zones humides du delta, non impactées par des activités humaines, devraient être peu magnétiques et être caractérisés par la présence de pyrites et de goethites à l'état de trace.

Les parois des murs des maisons sont réalisées avec les sédiments prélevés à proximité du site ; ils contiennent donc potentiellement des traces de goethite et de pyrite, associées à des débris végétaux. L'évolution de ce matériau composite, à l'air libre, favorise la formation de magnétite, tout comme cela se produit dans l'horizon A d'un sol qui devient plus magnétique que le substrat sur lequel il se développe. La magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ferrimagnétique) est l'oxyde de fer le plus magnétique. Néanmoins, sa teneur dans la terre à bâtir des murs reste modeste à ce stade. En comparaison avec les murs des maisons actuelles du même secteur, la susceptibilité magnétique est au mieux doublée. En revanche, si le mur est chauffé à des températures dépassant 300 à 350° C alors, du fait de la teneur en eau du milieu et de la présence de matière organique, la vapeur d'eau ou la combustion de la MO engendre un milieu réducteur qui favorise la transformation d'une partie de la goethite en magnétite, très magnétique, plutôt qu'en hématite (oxyde de fer ferrique ocre,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , anti-ferromagnétique cante), peu magnétique tout comme la goethite. Ainsi, la rubéfaction générée par le feu (dûe aux pigments d'hématite), est elle associée à une augmentation des capacités d'aimantation (dûe à la fraction de magnétite produite) qui, dans le cas présent, peut aller jusqu'au centuple [susceptibilité magnétique passant de  $0.25 - 0.30 \cdot 10^{-3}$  SI à  $25 - 30 \cdot 10^{-3}$  SI], du moins cumulé avec l'effet de la transformation de la pyrite.

En effet, de manière analogue à la déshydratation de la goethite, la pyrite subissant une oxydation modérée à haute température peut former de la pyrrhotite (appellation qui regroupe plusieurs formes de type  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  ( $x < 0.2$ ) avec la forme  $\text{Fe}_7\text{S}_8$  la plus remarquable du point de vue magnétique). Ce minéral, stable à l'air contrairement à la greigite, possède aussi une capacité d'aimantation élevée. Lorsque la chauffe se fait en atmosphère confinée – le cœur d'un bloc massif par exemple – l'oxydation est limitée. Au lieu d'une rubéfaction, il y a alors noircissement. Ces conditions sont, dans le principe, favorables à la formation de tels sulfures magnétiques.

L'incendie d'une maison constitue donc la source d'un enrichissement en minéraux magnétiques des matériaux ayant atteint une température supérieure à 300-350°C. Après l'incendie, les matériaux des murs cuits, ou simplement chauffés, acquièrent en refroidissant une aimantation, dite thermorémanente, d'intensité proportionnelle à celle du champ magnétique local, corrélativement à la capacité d'aimantation des matériaux. La direction de cette aimantation correspond à celle du champ magnétique ambiant au moment de l'incendie. Cette aimantation permanente

qui a enregistré le champ magnétique passé, associée à celle induite dans les matériaux par le champ magnétique local actuel, constitue les sources d'une anomalie locale du champ magnétique. L'enrichissement en minéraux magnétiques contribue à accroître l'anomalie locale du champ magnétique engendrée par l'impact du feu sur les matériaux. L'aimantation thermorémanente acquise lors du refroidissement est en effet proportionnelle à la teneur en minéraux magnétiques ; elle est d'autant accrue que l'enrichissement est élevé.

En résumé, la teneur élevée en minéraux magnétiques des vestiges des murs ayant chauffés tranche avec la faible teneur des sédiments de l'environnement du tell. De même, l'anomalie locale du champ magnétique engendrée par le feu est elle amplifiée par cet enrichissement en minéraux magnétiques. De ce fait, les méthodes magnétiques, fondées sur les propriétés magnétiques intrinsèques aux matériaux (susceptibilité ou viscosité magnétique) ou à leur conséquence sur le champ géomagnétique local (champ produit par les aimantations rémanente et induite), paraissent constituer les outils de la géophysique les plus adaptés pour déterminer la géométrie des maisons incendiées sur le tell.

## 2. L'information magnétique

L'idéal, pour retrouver la géométrie des vestiges des maisons brûlées, serait de déterminer la variation de la concentration en minéraux magnétiques, ou des aimantations naturelles permanentes qu'ils portent, dans un volume sous la surface du sol. En effet, comme nous venons de le décrire, les valeurs élevées d'aimantation ou de concentration en minéraux magnétiques marquent l'emplacement des matériaux ayant chauffés.

La concentration peut être estimée par la capacité d'aimantation d'un volume élémentaire de sol, par exemple après qu'il a été soumis à un champ magnétique, apte à le réaimanter, jusqu'à atteindre la saturation de son aimantation (aimantation rémanente isotherme). De même, la mesure de l'aimantation naturelle se réalise sur un échantillon de volume élémentaire et d'orientation connue. Pour procéder à ces mesures, il faut donc prélever un très grand nombre d'échantillons, puis retourner au laboratoire pour les réaliser. La démarche apparaît caduque, tant par son caractère fortement invasif que par son approche fastidieuse. L'information idéale n'est donc pas accessible dans une démarche non invasive et dans un temps d'acquisition réduit. Pour atteindre ces objectifs, il faut accepter une information approchante.

Sur le terrain, la mesure de la concentration en minéraux magnétiques peut être approchée par la mesure de la susceptibilité magnétique. Cette grandeur, qui correspond au rapport entre une aimantation et le champ magnétique qui la produit, est inféodée à la nature des constituants non magnétiques (inaptes à porter une aimantation permanente, mais portant une aimantation induite par le champ magnétique environnant). Dans le cas d'une concentration en minéraux magnétiques négligeable, la susceptibilité magnétique traduira la proportion de quartz et de calcite (diamagnétique) par rapport aux argiles (paramagnétique). Dans le cas contraire, cette grandeur reflètera la teneur en minéraux les plus magnétiques, telle que la magnétite, avec, comme nous le verrons, un rôle non négligeable de la taille des grains.

Les susceptibilimètres de terrain, ou Kappameter, sont des instruments de contact explorant des volumes pouvant être exprimés en  $\text{cm}^3$ . La mesure est très fortement dépendante de la rugosité de la surface mesurée. L'alternative est l'utilisation de conductivimètres, explorant de beaucoup plus grands volumes, pouvant alors être exprimés en  $\text{m}^3$ . Un conductivimètre mesure une susceptibilité magnétique relative, dite apparente. Les valeurs sont difficilement transposables en vraies valeurs de susceptibilité magnétique telles qu'elles sont mesurées sur échantillon ou avec des capteurs de contact (Kapameter). Ces conductivimètres ne nécessitent pas de contact ; de par leur important volume d'investigation, ces instruments permettent de dégrossir l'étude d'un site. Une grande surface peut être couverte en un temps réduit, mais à une résolution spatiale limitée. Les informations rapidement acquises permettent alors de cibler les zones d'intérêt à étudier à l'aide de méthodes de plus haute résolution, mais nécessitant un temps d'investigation plus long. Dans le cas d'un tell, cette étape de changement d'échelle n'est pas nécessaire compte-tenu de la surface limitée du site.

Les profondeurs d'investigation permises par les Kappameters étant très limitées (quelques centimètres au mieux (Lecoanet *et al.*, 1999), ces outils sont utilisables pendant une fouille archéologique, sur une surface décapée. Leur mise en œuvre reste fastidieuse si l'objectif est de relever une information transposable sous forme cartographique, chaque mesure nécessitant plusieurs secondes. De plus, la mesure réalisée est fortement influencée par la distribution de la taille des particules magnétiques nanométriques. En effet, la réponse du matériau en contact avec le capteur n'est explorée que sur un domaine temporel très bref, inférieur au millième de seconde. Selon leur taille, les particules ont une réaction d'amplitude variable.

Leur temps de réponse à l'excitation par le champ auquel elles sont soumises est aussi dépendant de leur taille. Ainsi, certaines particules, dites superparamagnétiques, très petites, ont une réponse bien plus élevée que des particules légèrement plus grosses (on reste dans le domaine nanométrique, les valeurs de tailles critiques dépendent du minéral considéré). Leur temps de réponse (ou plus exactement leur temps de relaxation) est inférieur aux durées du domaine temporel exploré ; elles se comportent comme des particules paramagnétiques, mais avec une réponse bien plus élevée. De ce fait, une valeur de susceptibilité magnétique ne peut être transposée en une concentration en minéraux magnétiques.

Sur le terrain, la concentration en minéraux magnétiques n'est donc pas directement accessible par de simples mesures à la surface du sol encore végétalisé. En revanche, la variation spatiale de cette concentration en minéraux magnétiques contribue à celle du champ magnétique local, tout comme les aimantations permanentes que portent les minéraux mais aussi l'ensemble des propriétés magnétiques des matériaux environnant, qu'ils soient magnétiques ou non. Ainsi, en accédant à cette variation spatiale du champ géomagnétique local, nous obtenons des informations sur la géométrie d'objets présents sous la surface du sol à partir des contrastes de propriétés magnétiques avec leur environnement.

Essayons de préciser la nature de l'information. Comme nous l'avons vu, une aimantation induite par le champ magnétique local est créée au sein des matériaux, proportionnelle à leur susceptibilité magnétique et à l'intensité du champ qui la produit. Cette aimantation induite s'ajoute à l'aimantation rémanente portée par les matériaux qui est, quant à elle, indépendante du champ magnétique ambiant. Ces aimantations rémanente et induite portées par un matériau créent un champ magnétique autour de lui, qui s'estompe en s'en éloignant. Ce champ d'origine locale s'ajoute au champ magnétique régional, créant une anomalie géomagnétique locale.

La détermination de la variation spatiale de l'intensité du champ magnétique terrestre permet donc d'observer ces anomalies. C'est l'objet de la prospection géomagnétique. Cette méthode de prospection géophysique ne nécessite pas de contact. Grâce aux cadences de mesure élevées des magnétomètres actuels, il est aisé d'obtenir une densité de mesures élevée en un temps de prospection modeste.

Dans le cadre de cette étude, l'information mesurée est l'intensité du vecteur champ magnétique. Cette intensité varie aux environs d'une source en fonction

de sa profondeur, sa distance, sa forme, l'intensité des aimantations permanentes qu'elle porte, le contraste de susceptibilité magnétique avec l'encaissant, la direction du nord magnétique par rapport à celle de la source, l'inclinaison et l'intensité du champ magnétique régional, la topographie... Parmi ces paramètres, les premiers sont les inconnues. Les derniers, bien que mesurables, sont communément déterminés à partir de modèles géomagnétiques globaux. Des modèles mathématiques permettent une reconstitution de la géométrie des sources, au prix de nombreuses hypothèses simplificatrices. Malheureusement, dans le cadre de cette étude, la distance réduite entre les sources et le plan dans lequel les mesures sont réalisées, la non coaxialité des aimantations rémanentes et induites, la variation topographique non négligeable au regard de la dimension du volume exploré... sont des paramètres difficiles à intégrer dans les modèles. De ce fait, une reconstitution de la géométrie des sources, en particulier concernant leur profondeur, est très incertaine.

Toutefois, afin de pouvoir préciser la position des vestiges des maisons incendiées sur le tell, une prospection géomagnétique originale 3D a été mise en œuvre. Le protocole développé vise plus particulièrement à préciser la profondeur des sources, surtout pour les plus profondes. Cette prospection se décompose en une prospection 2D horizontale (2DH) à résolution spatiale de l'ordre de 20 mesures par m<sup>2</sup>, et une prospection 1D verticale (1DV) correspondant à une diagraphie en puits de carottage, à une résolution infracentimétrique. La fusion spatiale des mesures est réalisée grâce au géopositionnement 3D (x, y, z) de toutes les mesures (2DH et 1DV). Pour cela, un réflecteur 360° est solidarisé aux différents capteurs de mesure du champ magnétique utilisés, par l'intermédiaire d'un dispositif spécifique à chaque prospection. La poursuite cinématique du réflecteur, concomitante à la mesure en continue de l'intensité du champ magnétique, est réalisée à l'aide d'une station totale motorisée. La fusion entre les mesures d'intensité de champ magnétique et leur géopositionnement est opérée sur la base de l'heure d'acquisition. La synchronisation des instruments est établie *a posteriori* à partir d'un événement enregistré simultanément par les deux instruments.

Dans un premier temps, le tell a été débroussaillé par les membres de l'équipe afin de disposer d'un espace dégagé. Par la suite, la prospection 2DH a été conduite selon des profils parallèles distants d'environ 1 m, en maintenant le capteur bas proches du sol, à une hauteur la plus régulière possible, de l'ordre de 0,2 m. L'implantation des sites de carottages a ensuite

été établie sur la base des anomalies géomagnétiques observées. Une fois les carottages réalisés, une diagraphie a été effectuée dans chaque puits, à l'aide d'un dispositif original, permettant ainsi d'accéder à une information verticale, sous la surface.

### 3. Matériels et méthodes

La prospection 2DH est réalisée avec un magnétomètre GSMP-35G GEM Systems Inc, pourvu de deux capteurs, programmé à une cadence de mesure de 20 Hz. Ce magnétomètre, fondé sur la technologie dite à pompage optique, fait partie des magnétomètres absolus. Son erreur d'étalonnage ne dépasse pas 0.1 nT. Les deux capteurs sont disposés verticalement, l'un au-dessus de l'autre, à 1 mètre de distance. Ces capteurs sont placés à l'extrémité d'un châssis de portage, fait maison, réalisé en tube de fibre de verre. La batterie Li-ion ainsi que la console de mesure sont placées en contrepoids à l'extrémité opposée, à environ 2,5 m, afin d'éloigner ces sources de perturbations électromagnétiques des capteurs (fig. 1). L'exactitude de la mesure obtenue dans cette configuration est meilleure que 0.1 nT, alors qu'avec le montage compact proposé par le constructeur, l'anomalie générée par la proximité des capteurs avec la console et la batterie génère une anomalie d'une intensité maximale de 0.5 nT, selon la direction par rapport au nord magnétique. Pour le géopositionnement des mesures par poursuite laser, un prisme 360° est fixé au-dessus du capteur haut. La surface prospectée par l'opérateur est couverte en parcourant l'espace en continu, à une vitesse de l'ordre de 1 m/s, selon des profils allers-retours parallèles. La trajectoire est établie visuellement à l'aide de repères, matérialisant l'extrémité de chaque profil, espacés tous les 1 m. Dans la mesure du possible, le capteur inférieur est maintenu par l'opérateur à une distance de l'ordre de 0,2 m au-dessus de la surface du sol.

Contrairement à la démarche habituelle de la mesure en configuration gradiomètre verticale, avec les deux capteurs superposés, la correction de la variation temporelle du champ magnétique n'est pas établie par la détermination du pseudogradient selon cette verticale (différence des signaux capteur bas - capteur haut). La variation temporelle est estimée par l'ajustement d'une fonction polynomiale d'ordre 3 à 6 – selon la nécessité – du signal temporel acquis par le capteur haut. Le premier ordre de variation de ce signal temporel correspond à la période des allers-retours. L'intérêt de cette approche est de conserver les variations de basse fréquence spatiale enregistrées par le capteur haut, perdu dans le calcul du pseudogradient, pour privilégier les sources profondes qui sont à l'origine de ces basses fréquences spatiales. Ce

gain est au détriment du non retrait des fluctuations temporelles locales du champ magnétique (pulsations continues et intermittentes) de période courte. Dans le cas de cette étude, compte-tenu de la durée pour réaliser deux profils successifs en sens aller puis retour, les fluctuations de période inférieure à 2 ou 3 minutes ne sont pas retirées. Au pire, en période de forte activité géomagnétique, ces fluctuations ne dépassent pas une amplitude supérieure à quelques nT. En période de faible activité, ces fluctuations ont une amplitude inférieure à 1 nT. La position du site, éloignée de toute zone urbaine, permet de se soustraire des sources de perturbations anthropiques généralement observées près des réseaux électriques.

Concernant la diagrapie géomagnétique (1DV), le diamètre du carottage ainsi que la longueur de câble nécessaire entre le capteur et la console d'enregistrement limitent fortement la technologie du magnétomètre utilisable. Avec la technologie actuelle, la miniaturisation nécessaire du capteur implique d'utiliser un magnétomètre de technologie fluxgate. Ces instruments sont vectoriels et ne peuvent être considérés comme absolus, présentant entre autres une dérive thermique. Celui mis en œuvre est un fluxgate triaxe Mag 03MSSL70 Bartington connecté à un convertisseur 24 bits DLM24Mag Cx STL Systemtechnik Ludwig GmbH, piloté par un ordinateur portable. Un étalonnage scalaire du capteur triaxe est réalisé à chaque série de diagrapies selon la procédure décrite par Olsen *et al.*, 2001. Bien que la précision de chaque axe soit meilleure que 6 pT à 1 Hz, après étalonnage scalaire, la précision de l'intensité du champ magnétique est de l'ordre de 1 nT. Cette imprécision élevée au regard de la précision

de chaque axe de mesure du capteur s'explique par l'impossibilité d'établir un étalonnage dans un champ magnétique parfaitement constant. Dans la pratique, l'information de diagrapie exploitée doit avoir une bien meilleure précision relative puisque le capteur reste pratiquement dans la même orientation vis-à-vis du vecteur magnétique local au cours de la diagrapie. Les erreurs d'inter-étalonnage entre les 3 axes du capteur ont alors peu d'incidence en mesure relative. La cadence de mesure programmée est de 357 Hz, pour permettre un éventuel filtrage des signaux 50 et 150 Hz provenant des réseaux électriques et pour s'affranchir des problèmes d'échantillonnage d'un multiple de ces périodes. Une telle correction n'est pas apparue nécessaire.

Le capteur immersible est inséré dans un étui protecteur en PVC et le câble de liaison est rigidifié par le recouvrement par un jeu de cornières en U emboîtées, en aluminium non magnétique, solidarisé à l'étui de protection (fig. 2). Une première cornière en U recouvre le câble, une seconde ferme le premier U en couvercle, la troisième vient perpendiculairement verrouiller le premier emboîtement. La structure est découpée en segments. La jonction de chaque couche est décalée afin de maintenir la rigidité de la structure. Le prisme 360° est fixé à l'extrémité haute de la perche ainsi constituée. La procédure de la diagrapie consiste à insérer la perche dans le puits de carottage à une vitesse de l'ordre de 1 m/s, puis à remonter le dispositif à la même vitesse en maintenant la verticalité de la perche. Cette opération, qui ne dure que quelques secondes, est reproduite 2 ou 3 fois par puits afin de pouvoir vérifier la répétabilité du signal de la diagrapie.



**Figure 1**

Structure de portage du magnétomètre construit avec des tubes emboîtés en fibre de verre, en situation lors d'un test préliminaire à gauche et lors de la prospection du 9 mars 2015 à droite (avec station totale implantée en mode tracking sur le tell de Taraschina).

Le géopositionnement de toutes les mesures d'intensité de champ magnétique est réalisé, que ce soit pour la prospection 2DH ou 1DV, par poursuite laser du prisme réflecteur 360° par une station totale S8 Trimble. Cette dernière ne possède pas d'horloge interne. Elle est connectée à une tablette PC et pilotée par le logiciel Trimble Survey Manager TM. Les mesures d'angles sont réalisées à une cadence de 20Hz

tandis que la distance n'est déterminée qu'à une cadence de 10 Hz, et interpolée pour doubler la fréquence jusqu'à 20 Hz. La capture des mesures se fait par l'intermédiaire du logiciel HyperTerminal qui va lire directement l'information que la station totale transmet à la Tablette PC sur le port USB. En raison de l'absence d'horloge interne, l'heure enregistrée n'est pas générée par la station totale, mais par la tablette.



**Figure 2**  
Dispositif de diagraphie (Taraschina, 2015).

Les processus de transfert des données numériques n'étant pas parfaitement en temps réel, une distorsion du temps enregistrée apparaît. Ce phénomène est révéillé par les variations de pas de temps calculé entre deux mesures successives. Les mesures sont, *a priori*, réalisées à une cadence constante de 0.05 s. Des mesures sont absentes, soit parce que la poursuite n'a pas permis d'établir une position fiable, soit parce que le dispositif d'étalonnage interne de la station totale a bloqué la mesure. Ainsi, la distribution des pas de temps entre deux mesures successives devrait être sur des multiples de 0.05 s. Pour autant, la distribution constatée se rapproche d'une loi de Poisson, avec le mode sur 0.05 s avec des valeurs dès 0.01 s. Afin de disposer d'une information temporelle plus proche de la réalité de la mesure que celle obtenue, une procédure de correction est appliquée. La démarche consiste à attribuer une valeur temps qui suit un pas de 0,05s (pour maintenir la périodicité du phénomène, le pas est très faiblement inférieur à 0,05s) ou un multiple en cas de non mesure.

Le passage du géopositionnement local au géopositionnement global est réalisé en post-traitement à partir du relevé des bornes géoréférencées. Le système de projection utilisé est Stereo 70.

La représentation des données constitue une étape importante de l'exploitation des mesures. Généralement, les résultats d'une prospection géophysique sont représentés sur forme « image », c'est-à-dire de cartes où l'espace est divisé en unités élémentaires (la maille ou le pixel), auxquelles est attribuée une valeur (selon une échelle de couleur, par exemple). Une telle démarche nécessite d'interpoler les mesures existantes, de distribution spatiale non régulière, pour attribuer une valeur à chacun de ces éléments. La valeur attribuée est déterminée à partir des mesures voisines, y compris pour les unités élémentaires non couvertes par une mesure. La loi d'interpolation doit être robuste pour ne pas engendrer une distorsion de l'information. Cette approche nécessaire est d'autant plus approximative que la surface étudiée est sous-échantillonnée. Compte tenu des cadences de mesures élevées des instruments utilisés et des distances réduites entre deux profils, la densité spatiale des mesures tend vers une couverture exhaustive de l'espace. L'étape d'interpolation pour combler les vides n'étant plus nécessaire, il devient alors plus pertinent de représenter le nuage de points en 3D avec l'intensité du champ magnétique en 4<sup>e</sup> dimension selon une échelle de couleur. Cette démarche présente l'intérêt de conserver une information sur la variation de distance entre la surface du sol et le capteur avec l'altitude (z). Une alternative, beaucoup plus consom-

matrice en temps de traitement numérique, consiste à combler les vides entre chaque mesure en attribuant la valeur de la mesure la plus proche à l'espace considéré. Pour cela, la surface est découpée en polygones élémentaires dont chaque arrête constitue la médiatrice entre deux points de mesure voisins. Ainsi, chaque mesure est-elle associée à un polygone. Cette représentation, nommée diagramme de Voronoï, présente l'avantage de ne nécessiter aucune hypothèse d'interpolation. En interdisant les polygones de trop grande surface, donc non représentatifs car provenant de secteurs sous échantillonnés, seules les données ayant une réelle représentativité sont exploitées.

Les données de diagraphie viennent naturellement s'intégrer dans la représentation 4D. Les graphiques sont réalisés avec le logiciel Voxler 4.0 de Golden Software et Matlab pour la représentation du diagramme de Voronoï.

#### 4. Prospection géomagnétique 2DH

L'étude du Tell a débuté en 2009 avec les premières prospections de surface et les premiers sondages. Dès 2011, Radu Dimitriu (GeoEcoMar) a conduit une prospection géomagnétique sur la moitié nord-est du tell (Dimitriu *et al.*, 2011). Du fait de l'utilisation de magnétomètres à proton, nécessitant une mesure statique, la prospection devient rapidement fastidieuse si l'on cherche à obtenir une haute résolution spatiale. Ainsi, lors de cette prospection, les mesures ont-elles été réalisées au nœud d'un carroyage métrique avec deux capteurs disposés respectivement à 0,75 et 2,75 m au-dessus de la surface du sol, soit 1 mesure par m<sup>2</sup> pour chaque capteur. Cela représente un peu plus de 4000 mesures sur une surface de l'ordre de 4000 m<sup>2</sup> pour chaque hauteur.

Pour comparaison, lors de la prospection que nous avons réalisée en 2015, la surface couverte en moins d'une journée avec le dispositif utilisé dépasse 7000 m<sup>2</sup> et a permis d'acquérir plus de 163 000 mesures par capteur. Cette rapidité d'exécution a permis une couverture quasi exhaustive du tell, mais a nécessité un défrichage préalable, plus laborieux, réalisé par toute l'équipe présente. Les zones basses périphériques n'ont pas été couvertes de manière régulière du fait de l'impossibilité de se déplacer sur ces surfaces humides sans portance. Dans la zone régulièrement couverte, plus de 20 mesures par m<sup>2</sup> ont été réalisées.

Lors de la prospection réalisée en 2011 par Radu Dimitriu, la correction de la variation temporelle du champ magnétique a été réalisée à l'aide de l'enregistrement de cette variation par un second magnétomètre mis

en base (statique) à une cadence de 1 mesure toutes les 15 secondes. Cette faible cadence, imposée par les capacités de mémorisation du magnétomètre, ne permet pas de corriger les variations pseudopériodiques de haute fréquence, c'est-à-dire de période inférieure à 30 secondes. Cette limite est similaire à celle du protocole utilisé pour le traitement des données de notre étude, utilisant les tendances de variation sur les cycles d'aller-retour. De ce fait, bien que réalisée avec des instruments et des protocoles différents, la correction de la variation temporelle entre la prospection de 2011 et celle de 2015 est de même nature. De ce fait, le niveau d'information est comparable entre les deux prospections.

Néanmoins, la hauteur de prospection au-dessus du sol diffère. En 2011 elle est constante, à 0,75 m du sol, tandis qu'en 2015 elle est plus faible, de l'ordre de 0,2 m, pour se rapprocher des sources, mais fluctue avec le balancement produit par le mouvement de la marche et l'évitement des amas de végétaux couchés au sol, imposant un relèvement du dispositif de portage à leur passage. En effet, la dynamique des signaux décroît en s'éloignant de la surface, de manière inversement proportionnelle à la distance à la source, élevée à une puissance entre 2 et 3 en général. Ainsi, pour la zone couverte en 2011, la carte des mesures réalisées à 2,75 m de la surface nécessite une échelle de moindre dynamique, environ 15 nT, par rapport à celle utilisée pour les mesures réalisées à une distance réduite à 0,75 m, qui dépasse 22 nT. L'échelle nécessaire pour représenter les données de la campagne de 2015, réalisée avec une distance à la surface réduite à 0,2 m est pratiquement décuplée, couvrant 150 à 200 nT de variation (bien qu'écrêtant les valeurs extrêmes produites par les masses ferreuses tels que les piquets des bornes de géomètre). Pour autant, la proximité accrue des sources lors de la campagne de 2015 ne peut expliquer, à elle seule, l'augmentation de la dynamique du signal. Il s'avère que la couverture quasi exhaustive du tell en 2015 comprend des zones de très fortes anomalies, non explorées en 2011, origine essentielle de l'augmentation de la dynamique du signal.

Une autre différence entre les approches de 2011 et 2015 concerne la logique de représentation des données. L'échelle de couleur, non linéaire, utilisée pour représenter la variation de l'intensité du champ magnétique des mesures de 2011 (Dimitriu *et al.*, 2011) vise à donner le même poids à chaque mesure. À l'opposé, l'échelle utilisée pour représenter les mesures de la campagne de 2015, présentées dans cet article, est fondée sur une répartition linéaire entre plusieurs seuils de couleurs. Elle a pour but de mettre

en valeur les anomalies extrêmes (rouge et bleu), potentiellement associées à des zones de feu, tout en discriminant les structures de plus faible contraste au sein des zones de variations plus modestes (en échelle de gris).

Quelles que soient ces différences, la géométrie des objets remarquables imagés à la fois en 2011 (à 0,75m du sol) et en 2015 (environ 0,2 m du sol) est comparable, démontrant la robustesse du signal géomagnétique. Il est à noter qu'il est nécessaire d'introduire une translation de l'ordre de 5 m vers l'ouest selon la direction de l'axe de carroyage du relevé de 2011 pour permettre une superposition des anomalies remarquables (telle que l'anomalie de la borne de géomètre B-02 dans l'angle sud-ouest par exemple).

La fouille du secteur 2 recoupe en partie nord une des anomalies majeures observées en 2011, non observable en 2015 du fait de la fouille archéologique alors réalisée (excavation et déblais). Cette fouille a mis au jour des blocs de terre cuite déstructurés pouvant être interprétés comme l'amoncellement volontaire de matériaux cuits en position secondaire. L'anomalie générée serait donc produite par les aimantations induites. Les aimantations rémanentes, de direction aléatoire, se compensant quant à elles dès que l'on s'éloigne de l'amoncellement. Il semble donc que la couverture de 2011 ne révèle pas de maison incendiée, puisque l'anomalie majeure observée ne correspondrait pas à un tel objet.

À l'opposé, la campagne de 2015 révèle 3 anomalies majeures dans le quart nord-est du tell, dans la zone non couverte en 2011 (fig. 3). Ces anomalies présentent une structure dipolaire avec une partie positive (figurée en blanc et rouge) plus vaste que la partie négative (figurée en noir et bleu) située au nord. L'intensité de ces anomalies apparaît au moins deux ou trois fois plus importante que l'anomalie majeure imagée en 2011. Deux de ces trois anomalies se trouvent en périphérie de la zone prospectée et ne sont pas imagées dans leur totalité. La première (A1), à l'ouest, est située sur le talus extérieur du tell principal correspondant au site 2. Cette zone plus basse, difficile à défricher à cause de la présence d'eau, n'a été que grossièrement couverte. La partie négative de l'anomalie, au nord, apparaît incomplète.

La seconde anomalie (A2) est située sur la marge nord du tell, dans la pente. La bordure nord de cette anomalie apparaît aussi incomplète (son pôle négatif étant partiellement tronqué), pour les mêmes raisons : cette zone est en limite de l'eau. Cette partie n'a pu être couverte par des profils aller-retour. L'opérateur



a avancé en crabe le long de la bordure émergée du tell, tout en maintenant les capteurs au-dessus de la zone ennoyée et en leur faisant faire un mouvement oscillant de gauche à droite pour couvrir au mieux la zone à portée du bras de la structure de portage. Les bordures est et ouest de l'anomalie positive de cette anomalie A2 apparaissent linéaires et parallèles. Une telle géométrie pourrait révéler des murs d'une construction incendiée.

La troisième anomalie (A3) est couverte dans son intégralité. Elle est implantée plus en hauteur, en bordure ouest du plateau du tell, en regard de la première anomalie située le plus à l'ouest. Cette troisième anomalie présente une structure principale rectangulaire (anomalie positive) à laquelle est adossée une seconde anomalie de moindre intensité, au sud/sud-ouest. Ces anomalies positives dessinent le plan d'un habitat, révélé par les vestiges des murs brûlés lors

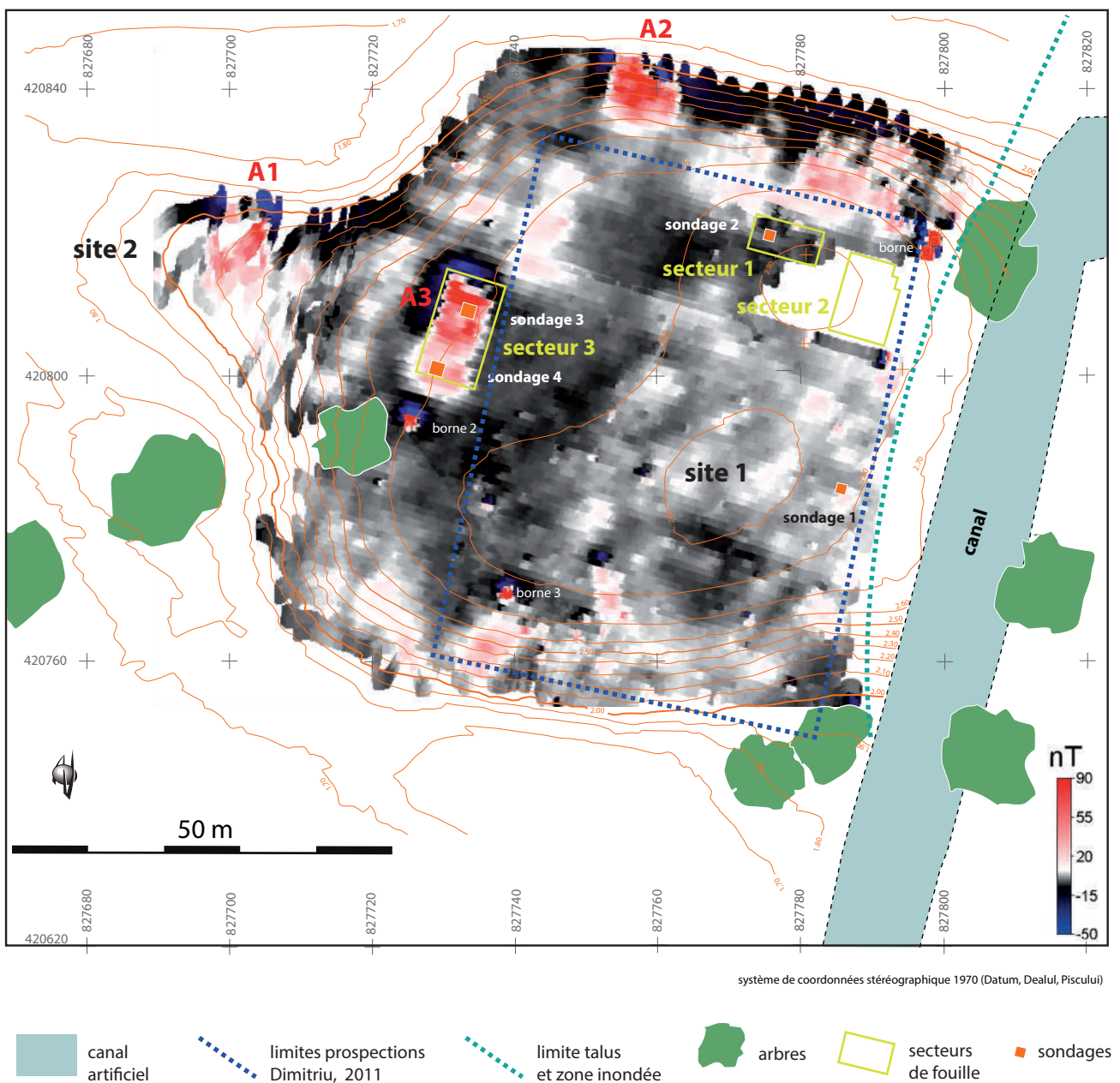


Figure 3

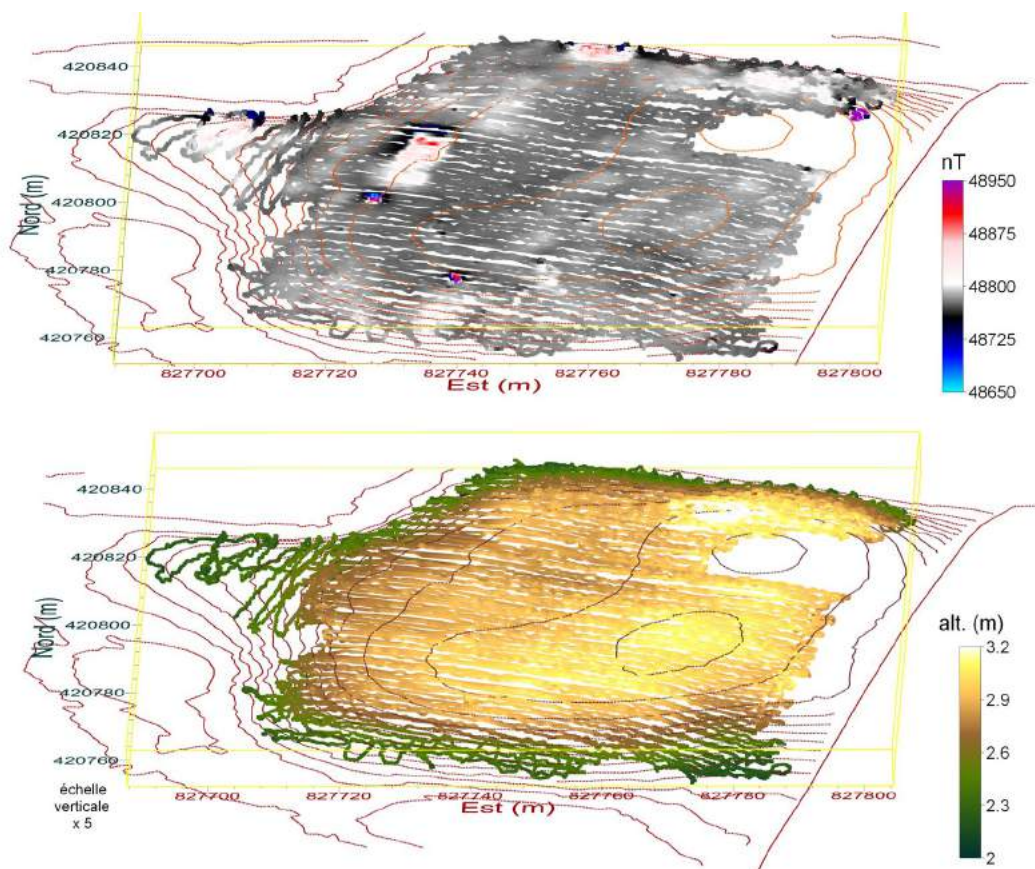
Prospections géomagnétiques de résolution inframétrique réalisée en 2015 avec l'emprise des sondages et zones de fouilles archéologiques antérieures et postérieures ainsi que l'emprise estimée de la prospection de 2011 (R. Dimitriu *et al.*, 2011). Carte pré-traitée du capteur à 0,2 m au-dessus de la surface du sol. L'emprise de la prospection de 2011 est établie par corrélation des cartes représentant l'information proche de la surface. La différence d'altitude des prospections peut engendrer un léger décalage selon l'axe nord-sud des structures.

de la fouille (secteur 3). Les limites est et ouest de la partie positive de cette troisième anomalie présentent une structure crénelée. Cette apparence ne correspond pas à une réalité mais à un biais du protocole facilement explicable. Tout d'abord, cette forte anomalie est localisée en bordure du plateau et la prospection est réalisée selon des profils qui s'avèrent être sub-perpendiculaires à la structure. De plus, le dispositif de portage est conçu pour que les capteurs soient sur une même verticale avec le réflecteur 360°, qui sert de référence pour le géopositionnement des mesures.

Ainsi, un profil réalisé dans le sens aller, de l'est vers l'ouest, sera conduit en descente au niveau de cette anomalie. Si l'opérateur conserve l'horizontalité du dispositif, alors les capteurs s'éloignent de la source dans la descente et, de ce fait, mesurent un signal atténué. Si l'opérateur corrige la pente en rapprochant les capteurs du sol, alors c'est le géopositionnement qui est affecté, décalant la mesure artificiellement vers l'ouest.

À l'inverse, dans le sens retour de l'ouest vers l'est, la pente en montée impose de relever le dispositif pour ne pas talonner le sol avec le capteur bas. L'inclinaison du dispositif engendre un décalage des mesures vers l'ouest, tout comme dans le sens aller. L'attention de l'opérateur étant captée par la visée de la trajectoire de marche, il est difficile pour lui d'anticiper les changements de topographie du parcours. Arrivé en haut de la pente, puis sur le replat après le changement de pente, l'opérateur redresse le dispositif, en retard par rapport aux capteurs qui sont devant lui. Ainsi, les capteurs s'éloignent du sol pendant un laps de temps. Ces changements de distance capteur-source et de décalage du réflecteur sont la source des artefacts constatés. La figure 4 est une représentation en perspective 3D des données, corrigées de ces effets, mises en vis-à-vis de l'altitude de chaque mesure. En plus du retrait de chevronnage induit par le changement de pente, deux autres corrections sont appliquées :

1- la prospection a été réalisée en deux temps, la partie sud du site a été prospectée durant la matinée ;



**Figure 4**

Représentation en vue oblique du nuage de points des mesures d'intensité du champ magnétique corrigée de la variation temporelle et des effets de décalage spatial des mesures et de la variation d'altitude des mesures. Les courbes de niveau sont celles produites par l'étude topographique du site, indépendamment de notre étude. Elles ont été extrapolées à partir d'un maillage de points topographiques.

la partie nord du site dans le courant de l'après-midi. La limite est visible au sud du secteur 2 (fig. 3). La variation temporelle du champ magnétique change de tendance au passage du soleil au zénith. Sur la figure 3, la correction de cette variation temporelle est réalisée sans tenir compte de ces deux périodes. Elle s'avère être imparfaite. Pour corriger ce décalage, une constante est introduite dans la valeur du champ mesurée en seconde période ;

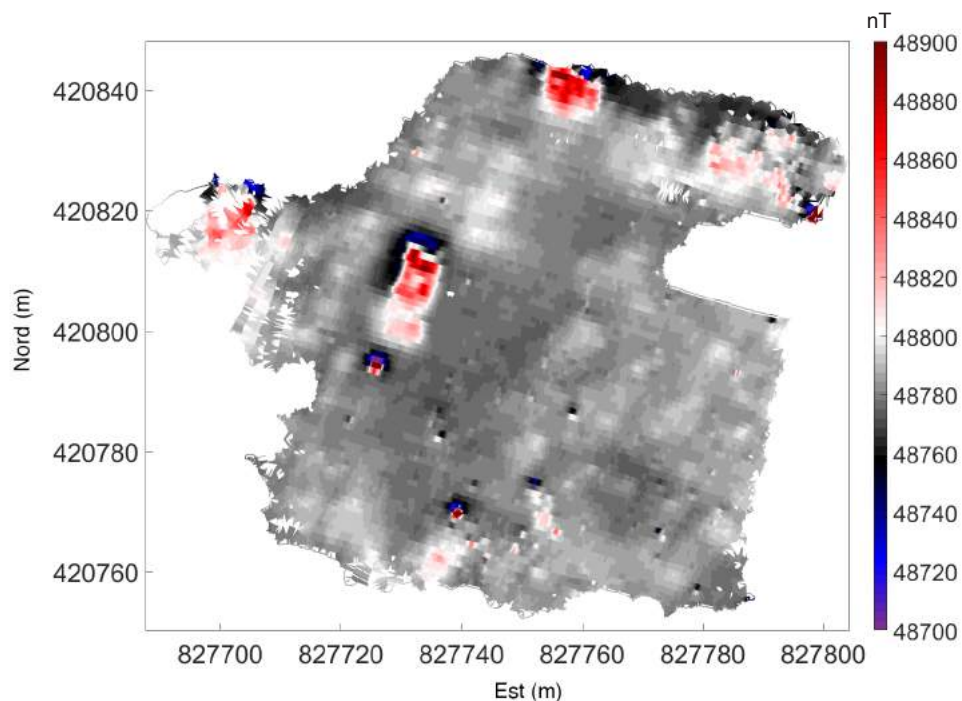
2- de manière analogue, des profils obliques ont été réalisés pour passer d'un secteur à l'autre. Ils recourent les profils subparallèles, par exemple visibles entre les deux bornes du quart sud-ouest sur la figure 3. Des positions de mêmes coordonnées sont donc couvertes deux fois, mais à des temps de passage différents. La correction de la variation temporelle appliquée ne corrigeant pas les variations de haute fréquence, son imperfection induit un décalage des valeurs. Les profils obliques, qui représentent les mesures réalisées en doublon, brouillent ainsi l'image. Ils sont supprimés.

Depuis cette prospection, un nouveau dispositif de portage a été conçu pour maintenir la verticalité des capteurs avec le dispositif de géopositionnement

(réflecteur 360° ou antenne GPS) et les repères visuels mis en place sont plus nombreux afin de faciliter le suivi du cheminement et permettre ainsi à l'opérateur de suivre plus fidèlement les variations de micro-topographie.

La texture de l'image magnétique obtenue (fig. 4 et 5) permet de distinguer plusieurs zones. Globalement, l'image peut être scindée en deux secteurs, grossièrement séparés par une limite d'axe NNE-SSW. À l'ouest de cette limite, les anomalies ont des dimensions caractéristiques supérieures à celles situées à l'est. Cette délimitation peut aussi être mise en relation avec la topographie, la partie la plus élevée correspondant assez bien avec la partie est. L'élévation de ce secteur et la présence des anomalies mineures structurées selon un axe NNE-SSW pourraient être la manifestation d'un remblaiement par des blocs de terre cuite provenant de maisons incendiées démantelées, tel qu'observé lors de la fouille du secteur 1.

À l'ouest, les trois structures d'habitat incendiées dominent la texturation de l'image. Néanmoins, les anomalies positives mineures situées sur la diagonale entre les deux structures incendiées du site 1 sont de



**Figure 5**

Diagramme de Voronoï de la prospection 2DH. Chaque mesure est figurée par un point. Si la surface des polygones délimitée par les médiatrices avec les points voisins est inférieure à 0,25 m<sup>2</sup>, alors l'espace autour du point est considéré de même valeur. Au contraire, si la surface est supérieure à 0,25 m<sup>2</sup>, cas des relevés périphériques par exemple, alors l'espace est considéré être échantillonné à une trop faible densité spatiale de mesure pour permettre une extrapolation à l'espace contigu à chaque point de mesure.

dimensions comparables à celles des structures brûlées. Pour autant, il est difficile de pouvoir affirmer que ces anomalies correspondent à des murs d'habitat non incendiés, d'autant que la dimension d'une anomalie en surface dépend de la profondeur, de la dimension et de l'intensité de sa source. Les reliques d'une construction non incendiée située à une profondeur analogue à celle d'un bâtiment incendié devraient apparaître avec des dimensions plus modestes, ce qui semble le cas.

À l'opposé, la texture des limites nord et sud du secteur est du tell montrent des anomalies de petites dimensions, de contrastes élevés, mais d'intensité plus modeste que les zones incendiées. Ces anomalies, marquées par des variations spatiales rapides, traduisent la présence de sources magnétiques dans la proche surface. Compte-tenu du contexte, ces matériaux magnétiques peuvent correspondre à des tessons, des fragments ou des amas de terre cuite, ou tout autres matériaux magnétiques récents. La prospection géophysique a été réalisée après une campagne de prospection archéologique ciblée, l'ouverture de sondages et la réalisation de fouilles plus étendues.

Ces actions apportent des informations. Elles ont aussi pu laisser leur empreinte magnétique, telle les anomalies magnétiques produites par les tranchés de diagnostics observables sur les images des prospections géomagnétiques réalisées à la suite de la remise en état du terrain.

La découverte de vestiges d'une habitation sub-contemporaine au sud, matérialisée par la présence de quelques briques de terre cuite et de fragments de restes métalliques (poêles à bois), apporte une explication probable à l'origine de ces anomalies à fortes variations spatiales, présentes dans le secteur sud.

Quant aux anomalies analogues situées au nord-est du tell, en l'absence d'indices, seuls des blocs de terre cuite présents en sub-surface ou l'apport localisé de terre contenant des résidus de terre cuite pourraient expliquer une telle texture de l'image. L'âge de ces apports, contemporains, sub-contemporains ou associés à une éventuelle phase de ré-haussement du tell par des matériaux provenant de constructions incendiées, ne peut être déterminé par l'image produite.

L'imagerie géomagnétique effectuée depuis la surface ne donne que peu d'indications sur la profondeur des objets. Les carottages réalisés pour l'étude du tell ont permis de recourir à un dispositif de diagraphie, conçu pour acquérir une information dans les puits de carottage, juste après leur réalisation, avant qu'ils ne se referment naturellement. Au vu de la carte

prétraitée produite (fig. 3), deux transects sub-perpendiculaires ont été définis pour implanter les carottages (fig. 6, figuré bleu).

L'emplacement des carottages sur chaque transect a été déterminé de manière à être situé au milieu des minimums et maximums locaux des anomalies magnétiques. Quatre autres carottages ont été implantés sur la structure incendiée (A3) la plus centrale afin de déterminer les limites nord et sud des murs (fig. 6, figuré vert).

## 5. Prospection géomagnétique 1DV

Le dispositif de diagraphie, fondé sur une électronique de laboratoire et non de terrain, n'a été testé pour cette application qu'une seule et unique fois avant cette étude. Le paramétrage des cadences de mesure a été défini pour pallier à des pollutions provenant du réseau électrique sans savoir si cette pollution pouvait être significative. De même, la répétabilité du signal reste une inconnue. Pour cette raison, les diagraphies ont été répétées 2 ou 3 fois pour chaque puits, chaque diagraphie correspondant à un enregistrement descente puis remontée. Il s'avère que les interruptions d'enregistrement de la station totale constituent la source majeure d'absence de reproductibilité du signal, par absence de géopositionnement des mesures. Si des interruptions de l'enregistrement du déplacement par la station totale se reproduisent au cours des diagraphies successives d'un même puits, alors la diagraphie produite correspond à une courbe composite construite à partir des répliquas. Cette construction d'une diagraphie composite n'a pas été possible pour un seul puits, par absence d'enregistrement des coordonnées des mesures.

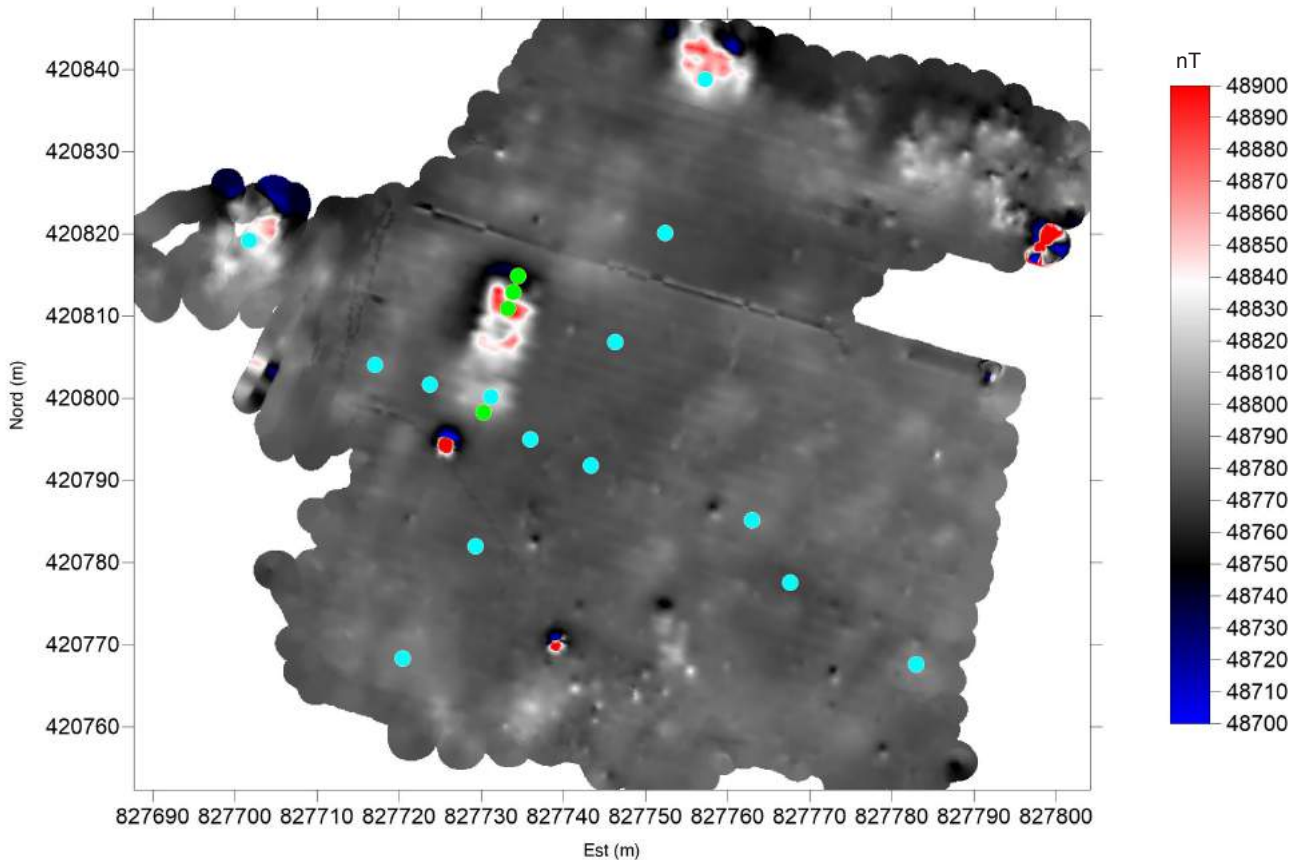
Pour vérifier la répétabilité, les diagraphies du transect WNW-ESE ont été refaites à un jour d'intervalle. Les différences significatives constatées concernent des puits dans lesquels des niveaux à blocs indurés (terre cuite) ont été traversés par le carottier. Dans ces cas, on observe que, lors de la descente ou de la montée du magnétomètre, son étui de protection (partie de plus gros diamètre du dispositif) a été accroché au niveau des blocs indurés. Cela se manifeste sur l'enregistrement de la station totale par un arrêt de déplacement. Des blocs ont donc très certainement été déplacés lors du déblocage du dispositif. Ces blocs étant très magnétiques et portant une aimantation rémanente élevée, leur déplacement est la source de modifications du champ magnétique dans leur voisinage (telles celles observées). Pour cette raison, les diagraphies du premier jour sont celles retenues, considérant que ce type de perturbations peut affecter le signal

après le premier passage. Quant aux autres puits, les erreurs de répétabilité traduisent un jeu de quelques centimètres selon l'axe vertical du capteur dans son étui, trop long de 1 ou 2 cm. Cet effet est détectable en comparant les digraphies réalisées en descente par rapport à celles réalisées en monté. En effet, le changement de contrainte sur le dispositif de diagrapie entre la descente – selon la gravité mais freiné par les parois (compression) –, et la traction pour la remontée (extension), peuvent entraîner une modification du calage du magnétomètre dans son étui, n'entraînant au pire qu'un décalage de 1 ou 2 cm, non significatif.

La figure 7 présente les enregistrements successifs de l'une des diagraphies réalisées dans un puits montrant des variations d'intensité de champ magnétique de faible dynamique (log 39, extrémité sud-est du tell). Les différences entre les 4 relevés sont mineures. De ce fait, sachant que ce relevé fait partie de ceux de faible variation et que la durée d'acquisition n'est que d'une dizaine de seconde, la correction de la variation temporelle du champ magnétique est totalement superflue et n'est pas réalisée. De même, la recherche

d'un signal associé au réseau électrique n'a pas été entreprise compte-tenu de l'absence de marqueur d'un tel phénomène.

Les courbes obtenues sont présentées dans la figure 8. Elles sont regroupées selon 3 transects en fonction de la position relative de chacun des puits telle que définie dans la figure 5. Les courbes provenant des zones de forte anomalie, qu'elles soient positives ou négatives, présentent les plus fortes amplitudes. Il faut noter que par l'effet de vide du puits de carottage, le sens de l'anomalie apparaît inversé par rapport à l'intensité d'aimantation relative de la source qui l'a produit. Ainsi, le passage dans un niveau très magnétique se traduira par une forte décroissance de l'intensité du champ magnétique, donc par une anomalie négative (Kristjánsson, 1975 ; Daly, Tabbagh, 1988). Afin de faciliter la lecture du signal, les abscisses sont en sens décroissant vers la droite, pour pouvoir traduire intuitivement le signal directement en terme d'aimantation des sources. Toutefois, dans le cas d'une maison brûlée en terre crue, les sources ne peuvent être considérées comme une couche magnétique

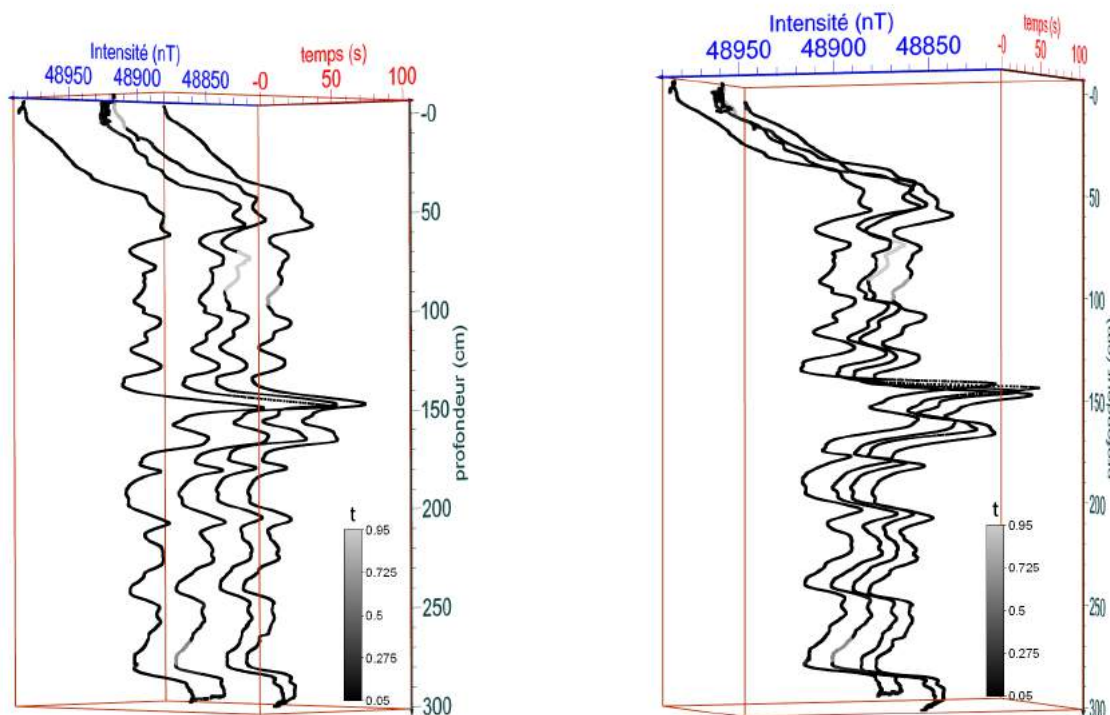


**Figure 6**

Implantation des carottages sur le tell en fonction des anomalies magnétiques observées sur la carte prétraitée, interpolée, réalisée les jours suivants la prospection. En bleu : localisation des deux premiers transects ESE-WNW et WSW-ENE ; en vert : complément réalisé sur la structure incendiée (A3) la plus centrale.

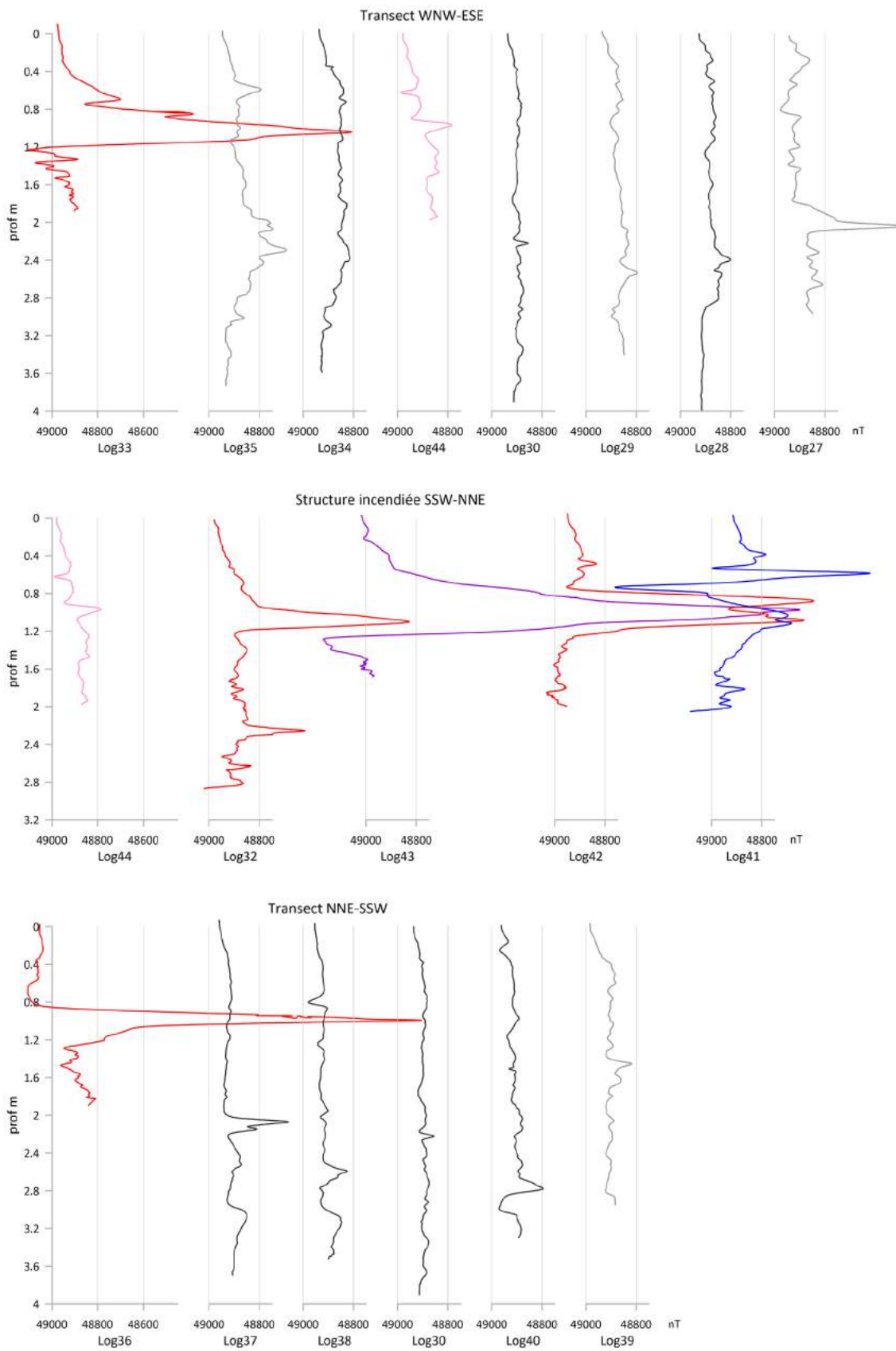
d'extension infinie. Il faut aussi considérer des sources ponctuelles. Tout comme pour la prospection géomagnétique en surface (2DH), une source magnétique ponctuelle produira, dans un puits voisin de la source, une anomalie dipolaire. La forme et l'amplitude de cette anomalie du profil de diagraphie dépend de la distance, mais aussi de la position relative entre le puits et la source par rapport au nord magnétique. Les Log 33 et 43 présentent une courbe d'intensité du champ magnétique de forme générale très similaire. Celles-ci peuvent être interprétées comme le passage dans une couche très magnétique avec toutefois un épaulement en sens opposé sous l'anomalie principale. Cet épaulement traduit très certainement l'hétérogénéité latérale des couches traversées. Cette forme se retrouve aussi avec la courbe du log 36, mais sa partie supérieure apparaît beaucoup plus influencée par l'anomalie positive observée en 2DH. La localisation de ce puits, en position topographique basse dans la partie nord du tell, est peut-être l'explication de cette singularité (effet négatif du creux topographique). Ces 3 courbes proviennent des puits de carottage centrés sur les 3 anomalies majeures interprétées comme des bâtiments incendiés. Le pic correspond alors au niveau cuit.

Les courbes provenant du transect de la structure incendiée (fig. 8) ne reproduisent pas toutes ce schéma. Bien que localisée à l'extrémité sud/sud-ouest de l'anomalie positive, la courbe du log 44 ne présente qu'une faible dynamique. Toutefois, le pic le plus important se situe à la même profondeur que des pics majeurs des puits voisins de ce transect, situé entre 0,9 et 1,1 m de profondeur. Ce pic mineur pourrait donc traduire soit la présence de matériaux chauffés, remobilisés après leur chauffe (retombées de débris de paroi chauffée) soit un faible impact thermique. À l'extrémité opposée, les deux puits nord/nord-est montrent une plus forte complexité. En particulier, le log 41, le plus au nord-est, présente une structure dipolaire à une profondeur de l'ordre de 0,7 m au-dessus du niveau produisant la forte anomalie reconnue dans chaque puits. Ce puits a été implanté pour être situé en bordure externe de la zone incendiée. Il s'avère qu'il recoupe un niveau chauffé entre 1m et 1,1 m de profondeur approximativement, mais de modeste intensité. L'anomalie dipolaire moins profonde correspond probablement à un bloc basculé, tel un parement de mur cuit qui se serait effondré, en position déportée par rapport au puits.



**Figure 7**

Enregistrement de la profondeur relative et de l'intensité du champ magnétique au cours des deux descentes et remontées successives en fonction du temps dans le puits du log 39 (extrémité sud-est du tell). L'échelle de couleur utilisée pour représenter un point de mesure est proportionnelle à la durée entre deux mesures de profondeurs successives déterminées par la poursuite laser. Ce puits est situé dans une zone de faible dynamique de variation spatiale du champ magnétique, au milieu d'une faible anomalie positive. L'intensité légèrement plus élevée autour de 50 cm de profondeur pourrait révéler la source modeste de cette anomalie de surface.



**Figure 8**

Diagraphies d'intensité du champ magnétique des puits de carottage. La couleur des courbes est celle de l'anomalie observée en surface, aux coordonnées du carottage.

La profondeur des niveaux incendiés par rapport à la surface est analogue pour les 3 structures. Sous ces niveaux incendiés, les pics observables sont de beaucoup plus faible amplitude, de l'ordre de 200 nT, à comparer aux 2000 nT du pic principal. Il serait tentant de rechercher une continuité entre ces pics dans l'idée d'identifier un niveau d'occupation du tell remarquable, tel un paléosol, ou un horizon correspondant à un épandage de matériaux associé à une utilisation du feu notamment. Cet exercice semble plus qu'hasardeux, sur la seule base des données de diagraphie géomagnétique, tant il n'est pas possible d'identifier une séquence qui se reproduise d'une courbe à l'autre entre les puits. Seule la partie inférieure, en dessous de 3,2 m de profondeur par rapport à la surface, montre une structure monotone, reflet d'un signal sédimentaire non anthropisé à attribuer aux lœss. Ce niveau monotone (Logs 28 et 37) est surmonté d'une augmentation de l'intensité des propriétés magnétiques. Par comparaison avec les séquences des lœss quaternaires de Chine, ce niveau correspondrait à un paléosol (un paléosol étant marqué par un enrichissement magnétique pédogénétique). Les phases d'optimum climatique de la période des dépôts des lœss ont favorisé le développement de paléosols. Parfois, le paléosol apparaît dédoublé (Log 30), démontrant que le plateau de lœss ne présente pas une simple sédimentation tabulaire.

Tout comme il semble délicat d'interpréter les signaux des diagraphies de faible amplitude dans la partie surmontant les niveaux de lœss, la relation entre les anomalies 2DH et 1DV des zones de faible dynamique n'est pas évidente. En effet, les carottages réalisés dans les secteurs de faible amplitude de la variation d'intensité du champ magnétique en surface (2DH, couleur du noir au blanc) présentent des signaux de diagraphie qui ne permettent pas d'identifier l'origine des anomalies de surface par la présence de matériaux plus ou moins magnétiques sous-jacents.

## 6. Prospection géomagnétique 2DH+1DV

La représentation 3D de l'ensemble des données permet une vue globale de la variation spatiale de l'information géomagnétique (fig. 9). Les sources magnétiques des 3 structures incendiées, identifiées en prospection de surface, sont bien recoupées en diagraphie. Toutefois, du fait de l'inclinaison du champ magnétique, la position des anomalies positives observées en surface est décalée vers le sud par rapport à la source (cas de l'hémisphère nord). Une démarche mathématique, dénommée la réduction au pôle, permet de recentrer l'anomalie positive à la

verticale de la source. Pour autant, cette démarche n'apporte pas une solution univoque. En effet, le résultat dépend des valeurs des variables utilisées, à savoir la déclinaison et l'inclinaison du champ magnétique qui est à la source des anomalies cartographiées. Les structures dipolaires sont numériquement recherchées selon l'axe défini par la déclinaison magnétique et chaque structure dipolaire est redressée selon la valeur d'inclinaison pour centrer l'anomalie. Ainsi, le pôle positif sera déporté en direction du pôle magnétique défini par la déclinaison introduite. Le déport sur cet axe sera d'autant plus important que l'angle de l'inclinaison avec la verticale (c'est-à-dire : 90° - Inclinaison, en référence à l'inclinaison au pôle) sera élevé.

Dans le cas d'une anomalie générée par une aimantation thermorémanente, le champ qui a créé cette aimantation thermorémanente diffère du champ actuel. Cette différence est due à la variation séculaire qui correspond à la dérive locale du champ magnétique. Ainsi, l'aimantation induite par le champ actuel, qui est proportionnelle à la susceptibilité magnétique des matériaux, et l'aimantation rémanente acquise au moment du refroidissement du matériau, ne sont pas strictement coaxiales. D'autre part, l'inclinaison et la déclinaison du champ magnétique local actuel ne sont pas mesurées lors de la prospection magnétique. Les modèles globaux permettent d'approcher cette information. Par exemple, pour le 9 mars 2015, date de la prospection, l'intensité du champ magnétique est de l'ordre de 48816 nT selon le modèle IGRF2020. Cette valeur est comparable à l'intensité moyenne mesurée, ~48780 nT. Selon ce modèle, l'inclinaison et la déclinaison de cette période sont de l'ordre de 62.8° et 5.9° Est, respectivement. L'intensité, l'inclinaison et la déclinaison magnétique du champ contemporain du refroidissement restent des inconnues. Au-delà de ces incertitudes, le modèle mathématique utilisé ne permet pas de distinguer le champ d'induction actuelle de celui de l'époque de refroidissement. Un champ moyen est alors utilisé.

La démarche consiste à produire différentes réductions au pôle, en recherchant une solution pour minimiser la dissymétrie des anomalies une fois réduite, en modifiant les paramètres. Une première étude a été produite avant toute obtention d'information complémentaire, en utilisant les paramètres du champ magnétique actuel fourni par les modèles de champ magnétique IGRF2020. Cette solution apparaît satisfaisante, réduisant notablement les anomalies négatives au NNW de la structure incendiée A3 (fig. 10b). Depuis, la fouille de cette structure centrale a été entreprise et a atteint les structures chauffées. Les relevés archéologiques permettent de localiser

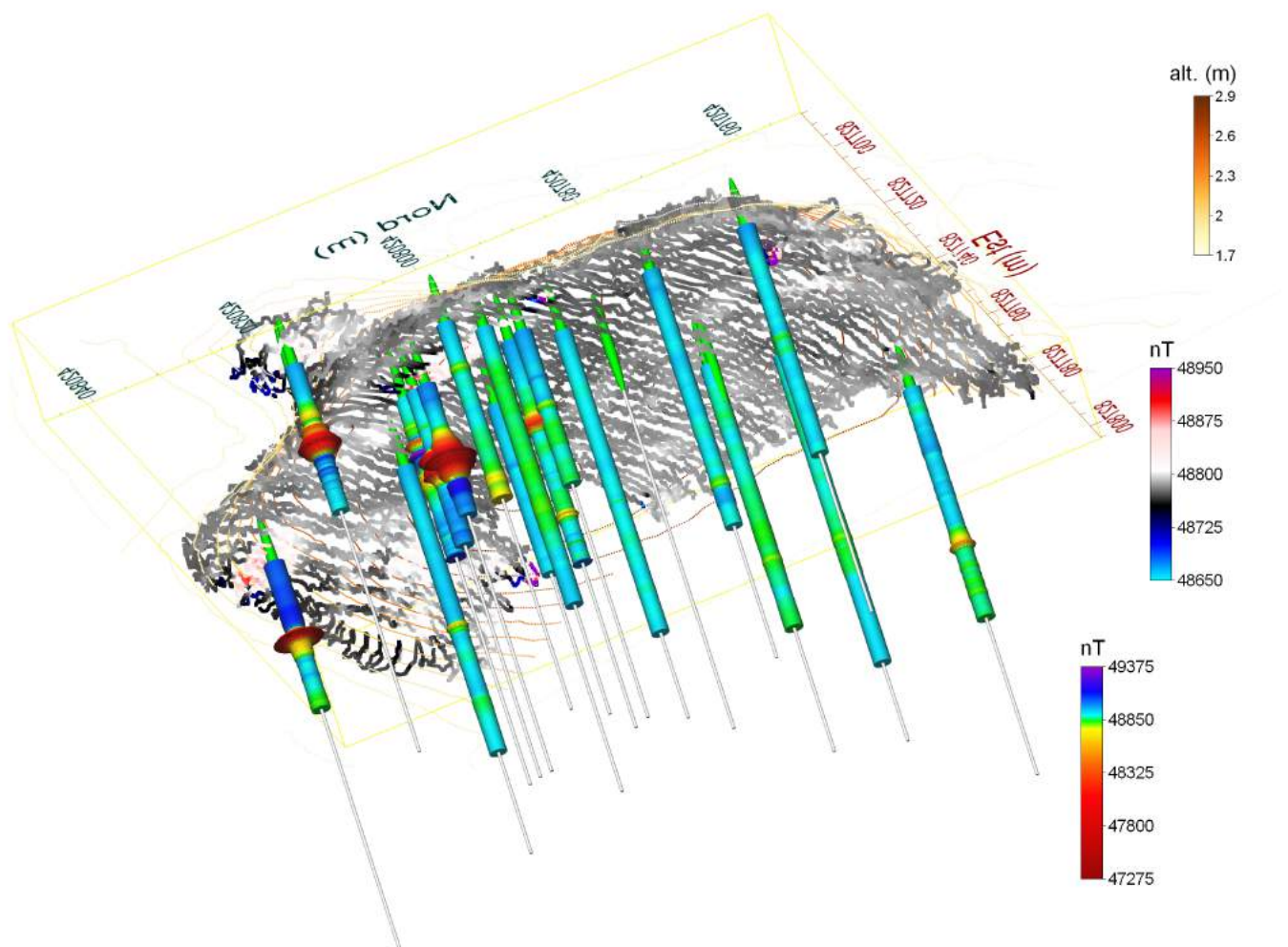


la position des vestiges des matériaux chauffés. La confrontation de ce relevé avec la première réduction au pôle réalisée montre un décalage vers l'ouest de l'anomalie réduite par rapport aux relevés archéologiques. Fort de cette constatation, une nouvelle optimisation des valeurs d'inclinaison et de déclinaison a été entreprise en recherchant un meilleur accord entre le relevé archéologique et l'anomalie réduite. Avec une augmentation de la déclinaison de  $+4.5^\circ$ , en conservant l'inclinaison actuelle, il y a un meilleur accord entre le pourtour du relevé archéologique et celui de l'anomalie positive (fig. 10c). Pourtant, l'épaule négatif de l'anomalie au nord, qui devrait être atténué si la solution était meilleure, est accentué. Avec une augmentation la déclinaison de  $+9.5^\circ$ , toujours en conservant l'inclinaison actuelle, l'accord avec la donnée archéologique est encore amélioré (fig. 10d) mais en accentuant le défaut d'atténuation de l'épaule négatif de l'anomalie au nord. Cet antagonisme entre 1. l'optimisation du paramétrage

de la réduction au pôle pour réduire la partie négative de l'anomalie au nord et 2. la superposition du pourtour du relevé archéologique à celui de l'anomalie positive montre que la paléo-déclinaison du champ magnétique divergerait d'une dizaine de degrés avec le champ actuel. Cette amplitude est compatible avec les modèles de variation séculaire. Il faut aussi considérer que des blocs aient pu basculer. L'aimantation thermorémanente de ces blocs modifie localement le champ magnétique, rendant l'anomalie trop complexe pour répondre parfaitement à un modèle de réduction au pôle.

## 7. Conclusion

L'imagerie magnétique constitue un outil à privilégier pour étudier les structures incendiées en zone humide. Le protocole de diagraphie géomagnétique en puits de carottage, développé spécifiquement pour cette

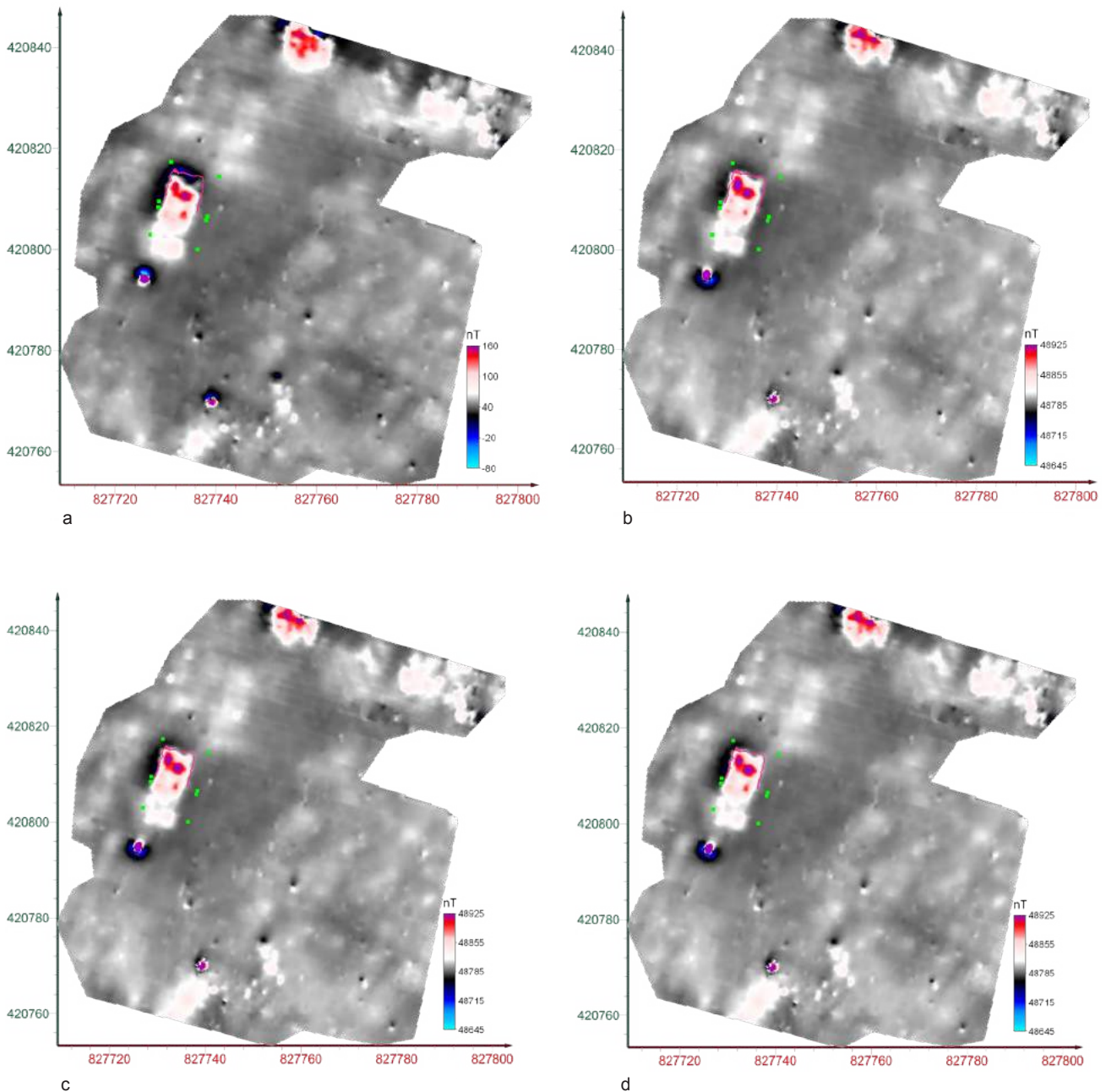


**Figure 9**

Représentation 3D des données géomagnétiques de surface 2DH et de diagraphie 1DV du tell. Les courbes topographiques, équidistantes de 0,1 m, sont surélevées de 0,5 m afin de délimiter le tell. Les puits sont matérialisés par une ligne blanche de 5 m de profondeur afin de pouvoir appréhender la profondeur relative de chacun d'entre eux.

application, a démontré son intérêt. Il permet d'apporter une indication précise sur les profondeurs des vestiges chauffés, voir cuits, parfaitement complémentaire à la prospection géomagnétique de surface. En dehors de ces objets très magnétiques, le constat est plus mitigé. Pour les zones de faible anomalie, la confrontation des données d'imageries

géomagnétiques de diagraphie et de prospection de surface n'apporte pas d'explication aux anomalies observées en surface. La densité spatiale des diagraphies, déjà élevée, est certainement trop faible au regard de l'hétérogénéité spatiale des dépôts très fortement anthropisés. Ce point constitue très certainement la limite de la méthode. En effet, augmenter la



**Figure 10**

Verticalisation de l'anomalie géomagnétique par réduction au pôle. Les carrés verts matérialisent les limites de la fouille. Le trait rose correspond à la limite des matériaux chauffés reconnus à la fouille. A : données interpolées avec une maille carrée de 0,2475 m de côté. Les secteurs non couverts de manière régulière ont été exclus ; B : réduction au pôle avec une déclinaison magnétique de 5,9° Est et une inclinaison de 62,8° correspondant aux caractéristiques du champ magnétique local à la période de la prospection ; C : réduction au pôle avec une déclinaison magnétique de 10,4°E et une inclinaison de 62,8° ; D : réduction au pôle avec une déclinaison magnétique de 15,4°E et une inclinaison de 62,8°.

densité spatiale de l'information (ce qui reviendrait à réaliser des carottages très proches les uns des autres) irait à l'encontre de la démarche mise en place : la moins invasive et la moins destructrice possible. D'autre part, du fait de la profondeur des vestiges, l'imagerie de surface ne permettrait pas d'augmenter notablement la précision de l'information, même en décuplant la densité spatiale des mesures, comme cela a été développé pour l'étude des sols des grottes préhistoriques. Les protocoles d'imagerie 3D à résolution infra-décimétrique sont transposables en plein-air, mais sur des surfaces limitées (une centaine de m<sup>2</sup>). Ils ont déjà fait leur preuve sur des foyers à galets (Lévêque *et al.*, 2019), des sites gaulois de production de sel par méthode ignigène (non publié) ou encore des épaves antiques (Lévêque *et al.*, 2016). Une information de meilleure qualité pourrait alors être obtenue, ce qui permettrait d'optimiser les traitements de réduction au pôle. En revanche, ces protocoles nécessitent, avec la technologie actuelle, un matériel conséquent. La mise en œuvre d'une telle démarche, susceptible de localiser l'implantation d'une fouille, apparaît démesurée. Par contre, elle peut constituer

un des volets d'une étude cherchant à reconstituer l'histoire thermique d'un objet. Pour cela, l'imagerie géomagnétique de surface et en puits doit être couplée à une étude paléomagnétique des matériaux chauffés, pour déterminer les blocs encore en place de ceux basculés post refroidissement. L'imagerie à résolution infra-décimétrique permet de faire le lien entre la prospection géomagnétique conventionnelle et l'analyse paléomagnétique sur échantillon. Ce lien est réalisé par un changement d'échelle tout d'abord – du site à la structure incendiée – mais aussi du bloc prélevé à l'échantillon qui en est extrait (Lévêque *et al.*, 2019). En zones humides – comme dans le delta du Danube – en dehors du contexte des structures incendiées ou des structures de chauffe, les méthodes magnétiques sont peu propices à l'imagerie de sites archéologiques, du moins tant qu'il n'y a pas d'apport ou de création de matériaux magnétiques. En effet, le contraste entre les sols, mêmes anthropisés, et les sédiments est faible. Il est donc préférable de privilégier les secteurs d'étude où il y a suspicion de présence de structures incendiées ou structures de chauffe, dans le premier mètre sous la surface.

## Références bibliographiques

**Daly, Tabbagh 1988** : DALY (L.), TABBAGH (A.) – Towards the *in situ* measurement of the remanent magnetization of oceanic basalts, *Geophysical Journal International*, Volume 95, Issue 3, December 1988, p. 481–489, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1988.tb06698.x>

**Dimitriu *et al.* 2011** : DIMITRIU (R. G.), CAROZZA (L.), CONSTANTINESCU (A.M.), MICU (C.), POP (I.C.), FLOREA (M.) – *Shallow subsurface geophysical investigation of a Chalcolithic site within the Danube Delta*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4610.4408>

**Kristjánsson 1975** : KRISTJÁNSSON (L.) – Geomagnetic measurements in drill measurements in drill holes through layered strata, *Geoexploration*, Vo-

lume 13, Issues 1–4, p. 45-55, doi: [org/10.1016/0016-7142\(75\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0016-7142(75)90005-8).

**Lecoanet *et al.*, 1999** : LECOANET (H.), LÉVÊQUE (F.), SEGURA (S.) – Magnetic Susceptibility in Environmental Applications: Comparison of Field Probes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 115, p. 191-204. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00066-7)

**Lévêque *et al.* 2016** : LÉVÊQUE (F.), REMAZEILLES (C.), MINJACQ (M.), PLASSON (N.), MATHE (V.), SANCHEZ (C.), JEZEGOU (M-P.) – *Magnetic wood impregnated with corrosion products of ghost nails: the case of ancient shipwrecks*. 15<sup>th</sup> Castle Meeting New trends on Paleo, Rock and Environmental Magnetism, 21-27 august 2016, Dinant, Belgique, p. 91-92.

**Lévêque *et al.* 2019** : LÉVÊQUE (F.), SOHN (M.), BURENS (A.), GAY (M.) – Fonction des structures de combustion à galets chauffés néolithiques du sud de la France : quelles informations peuvent apporter les méthodes magnétiques ? Unpublished in *L'archéométrie dans tous ses états : Perspectives interdisciplinaires sur une discipline en constante évolution*. XXII<sup>e</sup> colloque du GMPCA, 9 au 12 mai, 2019, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada, Poster 17.

**Olsen *et al.* 2001** : OLSEN (N.), TOFFNER-CLAUSEN (L.), RISBO (T.), BRAUER (P.), MERAYO (J.), PRIMDAHL (F.), SABAKA (T.) – *In-flight calibration methods used for the Ørsted mission. ESA SP on Space Magnetometer Calibration*. doi=10.1.1.41.3567