



HAL
open science

La Proutière. Caractérisation géophysique d'un petit bassin versant, en vue de préciser les relations entre topographie, nature du sous-sol et taux d'érosion.

Nicolas Florsch

► To cite this version:

Nicolas Florsch. La Proutière. Caractérisation géophysique d'un petit bassin versant, en vue de préciser les relations entre topographie, nature du sous-sol et taux d'érosion.. [Travaux universitaires] Université de La Rochelle et Sorbonne Université. 2002. hal-01548708

HAL Id: hal-01548708

<https://hal.science/hal-01548708>

Submitted on 27 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

P.N.R.H. Opération « PERMEABLE »

Caractérisation géophysique d'un petit bassin versant, en vue de préciser les relations entre topographie, nature du sous-sol et taux d'érosion.

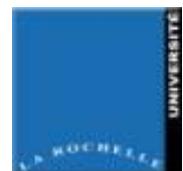
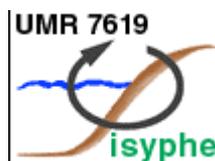


Responsable de la prospection géophysique et rédaction du rapport : Nicolas FLORSCH

Ont également contribué :

Cédric LANSEAU, Muriel LLUBES, Jean-Christophe MAURIN, Kim RENAUD, Guy WOPPELMANN, ainsi que nombre d'étudiants des Universités de La Rochelle et de Poitiers.

Novembre 2002



1. Introduction

Les processus d'érosion proposés dans la littérature ne sont, sauf pour quelques travaux récents, que rarement étudiés du point de vue de leurs relations avec le sous-sol. Le petit demi-bassin versant de « La Proutière » (près d'Aizenay, Vendée) constitue un site expérimental pour l'étude de ces relations, en domaine cristallin (massif granitique de la Roche-sur-Yon, mis en place il y a 300 Ma environ, au moment de l'orogénèse hercynienne). Bordé par le ruisseau qui l'incise (Figure 1), la partie SE du bassin présente, dans la direction perpendiculaire au ruisseau, un profil moyen proche d'une parabole. Dans la direction parallèle au ruisseau, on note deux ou trois talwegs relativement peu marqués.

Le granite est notablement altéré de place en place et présente fréquemment le faciès d'une arène plus ou moins élaborée. Un sol organique de faible épaisseur (quelques dizaines de cm au plus) et une mince couche végétale (prairie) recouvrent l'ensemble.

Notre objectif étant d'étudier la validité de modèles de processus érosifs, et notre prime conviction consistant à attribuer à la nature du sous-sol (et en particulier à son érodabilité initiale ou acquise) un rôle majeur, nous avons mis en œuvre plusieurs méthodes géophysiques afin de caractériser le sous-sol. Avant d'estimer les taux d'érosion grâce aux datations par les éléments cosmonucléides, nous pouvons explorer ainsi les relations entre la topographie (talwegs, crêtes) et le degré d'altération en profondeur (tout au moins sur les premiers mètres).

L'organisation du travail de terrain s'est plus articulée, dans un premier temps, autour de la disponibilité variable des matériels et des uns et des autres, puis en fonction d'une logique opératoire. Dans l'ordre :

Mars 2001 :	MNT par GPS différentiel et premiers essais de terrain
Juin 2001 :	EM38, SEV-pôle-pôle, traîné pôle-pôle, panneaux, sismique
Mars 2002 :	compléments EM38, PS
Mai 2002 :	EM31, compléments EM38, SEV-Wenner, sismique

La plupart de ces méthodes permettent *in fine* la détermination du degré d'altération du sous-sol. L'aquifère présent sur le site est pris en compte.

L'ensemble du travail de terrain représente probablement plus de 200 hommes.heures, sans compter, après cette phase, la mise en forme des données, l'interprétation et la synthèse.

Nous présentons d'abord les résultats méthode par méthode. Nous en faisons ensuite une synthèse succincte afin d'établir une perspective pour caractériser les relations entre la topographie, le degré d'altération du sous-sol et les phénomènes d'érosion.

2. Méthodes et résultats.

2.1. Topographie

La topographie est présentée sur la Figure 2. Le talweg qui se dessine vers $x=-50$ correspond à une descente vers l'étang. Sa partie inférieure a été manifestement remaniée pour consolider le barrage de la petite retenue. C'est d'ailleurs un peu avant d'arriver en bas que l'on rencontre un granit relativement sain, pratiquement affleurant.

Lors des premières campagnes, nous avons concentré notre travail sur le talweg qui traverse, de haut en bas, le rectangle entouré de blanc. Cette délimitation prend largement sur ses flancs, sa limite SW correspondant pratiquement à une petite crête qui fait office, en surface de petite ligne de

partage des eaux. C'est ce talweg qui est visible sur la photographie de couverture de ce rapport, au niveau des deux opérateurs regroupés.

2.2. Cartographie à l'EM31

Il s'agit d'une méthode électromagnétique de type Slingram, utilisant, en faible nombre d'induction, deux bobines coplanaires espacées de 3.6 m. Le paramètre mesuré (déterminant une réponse linéaire de la mesure) est la conductivité σ exprimé en mS/m (milli Siemens par mètre).

L'appareil a principalement deux usages : d'une part pour détecter des objets métalliques enfouis (particulièrement des canalisations), et répond à ces structures de manière très caractéristique, et d'autre part pour la cartographie électrique des formations superficielles. C'est à ce dernier usage que nous l'utilisons ici. En pratique sur un tel site, on peut estimer qu'il intègre la conductivité sur la tranche de profondeur comprise entre 1 m et 5 m, mais cela n'est qu'indicatif.

La Figure 3, dotée également des courbes de niveau de la topographie, montre la carte obtenue en maille de 5mX5m.

La zone brune, en bas à gauche, atteint une quinzaine de mS/m, ce qui correspond à une soixantaine d'Ohm.m (ou $\Omega \cdot m$). Sur le terrain, cette zone est effectivement très boueuse et semble argileuse. Mais en général, le terrain est peu conducteur, particulièrement dans la partie NE, où la conductivité reste sous les 10 mS/m, ce qui dénote que l'argile n'est généralement que peu abondante.

Les zones résistantes, en bleu, dépassent 200 $\Omega \cdot m$ de résistivité. Sachant que la prospection fut faite après une période bien humide, cela indique une *relative* absence d'eau dans ces endroits.

Les sondages électriques, en particulier, permettront d'affiner la compréhension de cette carte.

2.3. Cartographie à l'EM38

L'appareil est identique à l'EM31, à un changement d'échelle près : la distance inter-bobine de l'EM38, métrique, en fait un appareil pour la très proche surface. Il intègre la conductivité jusqu'à environ 1,5 m de profondeur, avec un maximum de sensibilité vers 40 cm.

La résolution spatiale de ces appareils étant pratiquement égale à la distance inter-bobines, nous avons commencé à travailler en maille de 1mX1m. L'examen des cartes nous a vite montré qu'une maille de 2mX2m est suffisante relativement à la variabilité spatiale sur ce terrain, et nous avons continué avec ce pas.

La Figure 4 représente, dans sa partie inférieure, la conductivité mesurée durant une période relativement sèche. La même zone a été mesurée à nouveau et étendue durant la saison humide. Dans le secteur commun (encadré par les pointillés), la conductivité est multipliée par un facteur 1,5 à 2, tandis que les images restent quasiment identiques d'un point de vue qualitatif. L'axe conducteur entre $x=15$ et $x=40$ correspond au talweg. Il est environ 4 fois plus conducteur que la crête voisine, ce qui est significatif d'un important contraste d'altération et de teneur en eau. Les zones les plus conductrices, en rouge, peuvent recéler une certaine proportion d'argile, mais qui reste vraisemblablement faible.

2.4. Cartographie de type « traîné » en pôle-pôle avec AM= 1m.

L'appareillage utilisé est un prototype de conception personnelle. La maille utilisée est métrique, en cohérence avec la distance inter-électrodes de 1m, mais eût pu, *a posteriori*, être plus large.

La carte, présentée sur le Figure 5, concerne à peu de chose près les mêmes profondeurs d'investigation que l'EM38 (en gros, une intégrale sur le 1^{er} mètre). Mais une méthode électrique de résistivité est linéaire en résistivité et « voit » donc mieux les résistants. Le traîné apparaît plus détaillé que l'EM38, ce dernier produisant un effet de lissage, car il va en quelque sorte « chercher » les conducteurs déportés par rapport aux bobines. L'image en résistivité fait inmanquablement penser à la présence d'une zone faillée, poreuse et perméable, dont l'axe principal irait de (x=40,y=0) à (x=25,y=75).

2.5 Les sondages électriques

Les sondages électriques se sont avérés très précieux pour préciser la structure du sous-sol. Dans la zone détaillée, ils ont permis de réaliser des cartes de résistivité en fonction de la profondeur et mettent particulièrement bien en évidence la topographie de l'aquifère.

Tous les sondages ont été doublés par des sondages perpendiculaires (« en croix ») afin de valider un minimum l'interprétation en terme de terrain tabulaire. Cette dernière hypothèse n'est évidemment pas parfaitement valable dans notre contexte.

Les résultats obtenus seront détaillés dans le chapitre consacré à la synthèse interprétative. Nous ne donnons ici que quelques sondages représentatifs.

L'intégralité des sondages exploitables sur la zone détaillée est donnée en annexe.

- Sondage en x=-100 et y=50

Avec un terrain superficiel à 250 $\Omega \cdot m$ et 3 m d'épaisseur surplombant un terrain à 125 $\Omega \cdot m$, on a ici une zone peu arénisée, le conducteur sous-jacent correspondant au passage dans l'aquifère.

- Sondage en x=-125 et y=10

L'arène assez argileuse à 35 $\Omega \cdot m$ et 3 m d'épaisseur surplombe une arène classique, saturée en eau. Le stockage de l'argile est rendu possible par l'horizontalité du terrain : les matériaux fins ne sont pas évacués par le ruissellement. Cette zone est d'ailleurs pratiquement imperméable.

- Sondage à x=-50 et y=10

La fin de ce sondage est délicate à interpréter (ambiguïté sur la dernière résistivité dont il résulte une ambiguïté sur l'épaisseur de la couche imperméable). Toutefois, avec un premier terrain de 70 cm d'épaisseur à 150 $\Omega \cdot m$, un intermédiaire d'épaisseur importante (plusieurs mètres à environ 80 $\Omega \cdot m$ et un substratum à peut-être 100 ou 150 $\Omega \cdot m$, nous sommes en présence d'une arène un peu argileuse d'une bonne puissance, passant ensuite à une arène plus propre et saturée. La pente est toujours faible à cet endroit.

- Sondage à x=5 et y=45

Pratiquement sur une zone résistante, ce sondage révèle une couverture de 30 cm à environ 200 $\Omega \cdot m$, puis un fort résistant à 725 $\Omega \cdot m$ surplombant, à 3 m de profondeur environ, un terrain à 60 $\Omega \cdot m$. On est là sur un granit relativement sain dans les premiers mètres, qui passe rapidement à une zone poreuse et saturée, peut-être un peu argileuse. Cela donne l'impression que la roche a été préservée de l'altération en surface, mais que l'aquifère la mine par en dessous. Mais il est plus probable que la faible résistivité sous-jacente corresponde à un artefact 2-D, les lignes de courants contournant le noyau résistant, ce qui conduit à une sous-estimation de la résistivité. Le résistant en surface est manifestement peu poreux.

- Sondage en $x=25$ et $y=75$

Après quelques décimètres résistants en surface, on passe directement dans une arène humide et épaisse d'au moins 5 m, de résistivité $165 \Omega \cdot m$, surplombant la nappe qui occupe un faciès identique avec une résistivité difficile à définir avec précision. Nous sommes là au milieu du petit talweg.

- Sondage en $x=45$ et $y=55$

L'arène est ici, à $380 \Omega \cdot m$ moins élaborée que pour le sondage précédent, et la nappe, moins profonde, se rencontre à environ 4 m.

2.6 Les panneaux électriques.

Ils ont été réalisés à l'aide d'un SYSCAL IRIS doté d'un système « multi-nodes ». Figure 7, les panneaux donnent une image très détaillée sur le profil $y=50$. Nous les corrélons sur cette figure avec les cartes EM31 (résolution 5 m et profondeur d'investigation maximum 5 m) et de traîné pôle-pôle (résolution 1m, profondeur d'investigation maximum 1 m). Attention à l'exagération verticale ! Par ailleurs, avec le jeu des « équivalences » 1-D, 2-D et 3-D en électrique, il ne faut prendre ces images à la lettre, l'espace des solutions restant assez vaste. En particulier, les images obtenues n'expriment aucun *a priori*, en particulier structural. Par exemple, le résultat ne saurait tenir compte du caractère continu du niveau piézométrique, si bien que la nappe ne peut directement être visualisée sur les sections.

Il apparaît clairement que le talweg au milieu de la zone comprise entre $x=0$ et $x=50$ est associé à deux zones très conductrices en profondeur, qui correspondent sans doute à des zones broyées très poreuses et contenant une proportion notable d'argiles (mais peut-être pas suffisamment pour en faire des barrières imperméables). Ces zones conductrices sont celles que détectent également les traîné pôle-pôle et l'EM38, mais ne constituent qu'un seul objet lissé pour l'EM31. La crête, dans la même zone, est bien constituée d'une sorte de noyau granitique dont il apparaît déjà que la préservation en limite l'érosion par rapport au creux du talweg.

Les « noyaux bleus » de résistants, bien visibles sur les deux sections, semblent ne pas s'étendre en profondeur. En réalité, c'est très vraisemblablement le passage en zone saturée (et non un changement de faciès de la roche réservoir) qui donne cette impression.

Pour finir, illustrons grâce à la figure 8 les limites qu'il faut accepter de ces investigations en sections. Ces images sont relatives à la pseudo-section obtenue sur le profil $y=0$, pour x allant de 0 à 47. Dans chaque groupe de 3 images, rappelons que l'image du haut représente les mesures, celle du bas la section inversée (donc en vraie profondeur), et l'image du milieu correspond à la pseudo-section recalculée à partir de la section inversée, et qui doit s'approcher au mieux de la pseudo-section mesurée. Dans le groupe du haut, on a utilisé la norme L2 (« moindres carrés »), tandis qu'en bas, il s'agit de la norme L1 (on minimise la somme des valeurs absolues des écarts, cette méthode étant plus robuste aux bruits). Dans les deux cas, les pseudos-sections reconstituées sont satisfaisantes, mais des écarts sont visibles entre les deux sections inversées. Dans cet exemple, ces écarts ne sont pas spectaculaires, mais en faisant varier d'autres critères pour l'inversion, ils peuvent le devenir davantage.

2.7 La polarisation spontanée.

Nous reprenons ici les commentaires et résultats, en les aménageant à peine, de Cédric Lanseau qui a effectué son stage de maîtrise sur ce sujet. Nous sommes motivés en cela par le fait que la PS subit un retour de mode et que de nombreuses équipes s'y intéressent aujourd'hui : la PS est redécouverte ! Nous avons conservé, dans son texte, ses références bibliographiques

La méthode PS a été utilisée depuis longtemps (~1830) dans la prospection minière (reconnaissance de dépôts de sulfure par la mesure d'un potentiel de minéralisation) [8].

Elle est utilisée depuis une vingtaine d'années seulement pour la reconnaissance hydrogéologique. Dans ce dernier contexte, l'utilisation de la PS a fait l'objet de plusieurs études [4], et particulièrement en zones volcaniques [2],[5].

La PS est définie comme étant la génération de potentiels électriques dans le sol sans influence humaine.

Différents types de potentiels ont été mis en évidence expérimentalement :

- un potentiel de minéralisation associé à la présence de sulfures métalliques partiellement enfouis dans l'aquifère (qui crée une réaction d'oxydo-réduction) [8].
- un potentiel d'électrofiltration associé à l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux sous l'influence de la gravité ou sous pression.
 - un potentiel osmotique associé à la succion de l'eau par les racines des plantes.
 -

Une étude sur certains paramètres extérieurs (comme la végétation) pouvant influencer la mesure du signal causé par l'électrofiltration a été effectuée [4]. En connaissance de cause, les électrodes seront enfoncées dans le sol d'une dizaine de cm pour éviter de capter le signal causé par la végétation.

Dans le cadre de cette étude, nous partons du principe qu'il n'y a pas de minéralisation vu le contexte géologique. Ainsi, on suppose que potentiel mesuré en surface est causé uniquement par l'électrofiltration, la prospection ayant été effectuée après une période pluvieuse.

La prospection PS requiert un équipement assez simple : 1 voltmètre et une paire d'électrodes dite impolarisables. Une telle électrode est constituée d'une enceinte (en forme de tube) contenant une tige de cuivre (électrode) immergée dans une solution sursaturée de sulfate de cuivre. Le fond de l'enceinte est constitué de bois poreux ce qui permet à la solution de percoler et ainsi de faire contact avec le sol [8]. L'intérêt d'un tel dispositif va être de conserver un potentiel d'électrode constant et résiduel dont on s'affranchira pour ne mesurer uniquement que ce qui provient de l'électrofiltration.

Une maille de 5 m a été utilisée pour couvrir une zone de 125 sur 100 m. Par ailleurs, afin de vérifier que cette maille n'était pas trop lâche, une zone test en maille de 2 m a été réalisée au cœur du talweg (10 m sur 50 m). Elle permet également de juger de la reproductibilité de la méthode (Figure 9).

L'électrode de référence, fixe, est positionnée en (0,0). On attribue à chaque point de mesure la différence de potentiel mesurée entre ce point et la référence.

Il convient de distinguer deux effets à l'origine du signal mesuré : la vitesse d'écoulement du fluide et la profondeur du toit de l'aquifère (profondeur de la zone non saturée). La topographie doit être prise en compte dans l'analyse des résultats.

La carte de PS (Figure 10) montre des anomalies positives et négatives et semble porteuse d'informations sur l'écoulement. Ainsi, on retiendra la règle simple suivante : une zone drainante se signalera par une anomalie négative, une remontée de zone imperméable par une anomalie positive [1]. L'anomalie fortement positive (+14mV), en haut à gauche est causée par la saturation en eau de la surface. Les données de la bordure gauche ($X=-50m$ et $50<Y<90$ m) sont à considérer avec prudence car la zone est anthropisée (chemin argileux, talus). Des anomalies négatives (jusqu'à -13mV) s'organisent le long de la rupture de pente et redeviennent positives dans la partie basse. On remarquera que l'anomalie négative située autour du point ($X=35,Y=25$) coïncide avec une forte conductivité du milieu et indique donc bien une zone drainante. En bordure du talweg, une forte

anomalie positive (+12mV) est mesurée autour du point (40,75) indiquant probablement un fort écoulement proche de la surface.

Variation d'épaisseur de la zone non saturée :

Certaines études ont été menées par Aubert et Yene Atangana [2] afin d'établir des règles empiriques reliant la distribution des équipotentielles PS à la variation d'épaisseur de la zone non saturée. Il ont pu montrer que, sous certaines conditions (homogénéité de la résistivité de surface et contraste de résistivité important avec le milieu sous-jacent), l'amplitude PS négative était proportionnelle à l'épaisseur de la zone non saturée. Cette relation s'écrit :

$$H(x,y) = h(x,y) - V(x,y)/K - E_0 \quad (1)$$

$h(x,y)$ étant l'altitude du lieu, $V(x,y)$ l'amplitude PS, E_0 est l'épaisseur de la zone non saturée à l'aplomb de l'électrode de référence, K est un gradient (mV/m) qui dépend du site et $H(x,y)$ est l'altitude d'une surface géophysique dite SPS. Cette surface représente l'interface entre le premier terrain non saturé et un second terrain comprenant à la fois la zone saturée, quand elle existe, et le substratum imperméable. Les constantes E_0 et K seront estimées à partir de la carte de la profondeur de l'aquifère (profondeur déduite des résultats des sondages électriques obtenus en Juin 2001). On obtient $E_0=5$ et $K=-3$.

Avec cette relation, nous présentons plus loin la « surface SPS », qui est finalement indicatrice de la profondeur de l'aquifère.

3. Synthèse et interprétation.

Dans ce paragraphe, nous proposons une description du sous-sol qui s'appuie sur les résultats géophysiques et leurs interprétations. Nous discutons brièvement des premiers enseignements que l'on peut en tirer du point de vue des processus d'érosion, c'est-à-dire, ici, des relations entre la topographie et la nature et la qualité du sous-sol.

3.1. Interprétation pour le secteur détaillé (x de 0 à 50 et y de 0 à 100).

Ce secteur a été initialement choisi pour couvrir la pente depuis la partie supérieure (en $y=0$, pratiquement en plateau) jusqu'au ruisseau ($y=100$ et des poussières), et, selon x , pour couvrir un petit talweg, perpendiculaire à l'axe du vallon, et qui passe à peu près au centre de la zone : revoir la Figure 2. Il existe bien deux autres talwegs, mais l'un correspond à un chemin vers $x=-50$ (donc est très fortement anthropisé), tandis que l'autre, sur la partie gauche de la carte, est moins marqué et aboutit en aval au niveau de l'étang, soit plus haut que le talweg retenu.

L'examen rapide du sol (mais aussi l'expérience d'y implanter des électrodes) montre que dans la pente proprement dite (ni sur le plateau supérieur, ni sur le platier inférieur), ce ne sont pas des colluvions qui succèdent au sol arable, mais directement l'arène granitique en place, sur laquelle est développé le sol de faible épaisseur.

La carte d'EM31 (Figure 3) dont on peut rappeler la profondeur d'investigation pluri-métrique (la tranche 1 à 5m), indique que l'axe du talweg est conducteur, tandis que particulièrement sur la gauche de cet axe, on trouve une masse résistante qui révèle un granit moins altéré, qui déborde un peu vers les x négatifs. Le contraste de conductivité, de l'ordre de 2, ne peut cependant être interprété, car l'EM31 intègre des terrains beaucoup plus variables.

Sur les images de résistivité de l'EM38 et du traîné pôle-pôle (Figure 4 et surtout Figure 5), le conducteur apparaît bifide, ce qui est largement confirmé par le panneau en section verticale de la zone pour $y=50$, Figure 7, en bas. Or, *a priori*, l'EM38 et le traîné ne « voient » pas au-delà du 1^{er} mètre de

profondeur. Nous sommes là, comme on le verra par la suite, bien au-dessus de l'aquifère. Les variations observées, dont le contraste, entre résistants et conducteurs atteint 6 sur la carte de traîné, reflète bien un contraste de nature (d'altération) entre les lieux correspondants. Les deux « patates » conductrices visibles sur la section (dont la verticalité est exagérée par un effet d'échelle) correspondent certainement à des zones préférentielles d'infiltration d'eau, très altérés et poreuses, et contenant des argiles, mais pas au point de colmater, pensons-nous, les vides. En effet, la résistivité y est encore d'une centaine d'Ohm.m (même si les sections inversées donnent moins, car il faudrait intégrer sur un espace correspondant à la résolution de la méthode), donc l'argile y est présente, mais peu abondante. Pour affiner cette interprétation, il eût fallu échantillonner l'eau qui circule là, ce qui n'a pas été possible par absence de forage. Cela eût rendu possible le calcul du facteur de formation, moyennant quelques hypothèses peu engageantes sur les porosités.

Toutes ces cartes ne donnent pas de bonnes informations sur l'aquifère. Même la section de RES2DINV ne convient pas pour cela, car elle ne suppose pas la présence d'une interface plus ou moins gauche, et conduit à une intégration 2-D (et même 3-D) des résistivités sur un volume déterminé par la résolution de la méthode (qui vaut à peine mieux que la profondeur du « pixel » courant).

Pour obtenir des informations sur l'aquifère, nous avons préféré nous fonder sur les Sondages Electriques Verticaux (SEV). Sur ce secteur, ils ont été réalisés sur une maille de 10mX10m, en pôle-pôle (pour x allant de 5 à 45 et y allant de 5 à 95). Ce dispositif, un peu inhabituel en sondage, a été choisi en raison de sa robustesse vis-à-vis des hétérogénéités de surface et latérales. Les sondages ont été systématiquement croisés (un selon x, un selon y), afin d'éviter certaines méprises lors de l'interprétation. S'agissant de caractériser les premiers mètres, la distance AM a été limitée à 10 m, donnant une réponse bien interprétable jusqu'à 5 m environ. De rares sondages, de médiocre qualité (problèmes de mesure, en général), n'ont pas été pris en compte (pas de sondage, par exemple, en x=15, y=85).

L'avantage du sondage est qu'il permet de définir des entités géo-électriques bien distinctes. Il permettra d'identifier la couche arable, l'arène sèche, l'arène saturée, le granit sain etc.. Mais plutôt que de tracer des isopaques de ces entités, et considérant que le risque de se tromper est d'autant plus grand que le caractère tabulaire des formations présentes est plus douteux, nous avons préféré exploiter les sondages en relevant la résistivité à diverses profondeurs *après interprétation*, ce qui est certainement moins sujet à de grossières erreurs. Deux exceptions, toutefois. Nous avons cartographié, lorsqu'il fut possible de la définir, l'épaisseur du sol arable, et, d'autre part, nous nous sommes mouillé pour la profondeur de l'aquifère.

L'épaisseur du sol arable, ainsi que les résistivités en surface (entendre : le 10 premiers cm) et à 50 cm de profondeur, sont donnés sur la Figure 11. On observe les points notables suivants :

- l'épaisseur des terrains arables varie entre quasiment rien, dans la partie supérieure du terrain (en bas, sur la carte), à une épaisseur de 40 cm par endroit (au-dessus du résistant, par exemple), avec un maximum au niveau d'une sorte de poche, en haut sur la carte, qui correspond sur le terrain à une petite zone boueuse en bas de pente. Cette dernière me semble être une mini terrasse du ruisseau, mais avec les travaux d'aménagement de l'étang tout proche de cet endroit, c'est difficile à certifier. En tout état de cause, on ne peut affirmer, à cette dernière exception près, qu'il existe une corrélation explicite entre l'épaisseur de cette couche de terre définie comme unité géo-électrique) et la position, amont ou aval, dans la pente principale. Peut-être là où la pente est la plus forte, au point d'inflexion, la couche végétale est-elle un peu plus épaisse, mais cela n'est pas réellement convainquant (sur la ligne approximative y=60).
- La résistivité de surface est plus faible dans l'axe du talweg. La terre doit y être plus humide, peut-être par capillarité de la nappe, ou bien concentre plus d'argiles, par l'effet du ruissellement ?

- A 50 cm de profondeur, le figuré vert correspond à environ 300 Ohm.m, résistivité que nous attribuons à une arène relativement sèche et peu argileuse. Au centre du talweg, la résistivité chute à environ 200 Ohm.m, ce qui n'est pas très différent, et peut résulter d'un degré d'altération à peine plus important, ou d'un peu plus d'argile ou d'humidité. La tache rouge en haut à gauche de la carte montre que l'on est là dans une poche superficielle d'argile. Enfin, il est frappant de constater que la résistivité du noyau résistant, au milieu à gauche, monte à plus de 800 Ohm.m, ce qui indique sans équivoque un granite très peu altéré et encore compétent.

Sur la Figure 12, ce sont des sections horizontales de résistivités à 1 m, 2 m et 4 m de profondeur que nous proposons. Le talweg est bien corrélé avec ces cartes. Mais le plus frappant concerne l'inversion de rapport de résistivité qui intervient entre l'axe du talweg (dont la résistivité change peu, car même à 4 m de profondeur, l'aquifère n'est pas rejoint) et les zones résistantes de part et d'autre du talweg. En-dessous de 4 m, les zones résistantes en surface deviennent les plus conductrices ! Cela est cohérent avec notre interprétation de la profondeur de l'aquifère à partir des sondages électriques et confirme son identification. Toutefois, comme on le rappelle ci-dessous, les résistivités sous les noyaux résistants ont toutes les chances d'être sous-estimées (du point de vue quantitatif), du fait d'effets 3-D.

Il est maintenant possible de fixer les résistivités des formations rencontrées :

- Granit peu altéré, hors aquifère : $> 500 \Omega \cdot m$
- Granit peu altéré, zone saturée : entre 150 et 200 $\Omega \cdot m$ (les sondages indiquent moins, mais ont perdu la résolution aux longueurs de ligne qui permettent de passer sous les noyaux de granit résistant, d'autant que les effets 3-D qui affectent le résultat d'une interprétation tabulaire sous-estiment la résistivité sous-jacente par un effet de canalisation du courant sous le résistant. On se base alors pour ces valeurs aux résultats de l'inversion 2-D des pseudo-sections, bien plus fiables dans ce contexte, car tenant compte de ces hétérogénéités).
- Arène hors aquifère : 120 à 220 $\Omega \cdot m$
- Arène zone saturée : 60 $\Omega \cdot m$ est compatible avec tous les sondages (mais on peut adopter 40 à 80 $\Omega \cdot m$ également, sur les fins de courbe !)

En tout état de cause, cette dernière résistivité, sous-jacente, à plus de 5 ou 6 m de profondeur, est difficile à déterminer, car les sondages perdent fortement en résolution latérale pour des longueurs de lignes qui devraient atteindre la cinquantaine de m pour bien déterminer ce paramètre. L'objectif de ce travail n'étant pas d'identifier les paramètres physiques à ces profondeurs, nous n'avons effectué qu'un sondage rapide allant plus profond, en Wenner, parallèlement à l'axe des x, qui est représenté sur la Figure 13. Placé en coordonnées $x=25, y=45$, soit sur l'axe du talweg et perpendiculairement à lui, il en déborde largement (les deux sondages pôle-pôle, selon x et y, donnés dans l'annexe, ont été interprétés conjointement (dans une perspective différentielle) avec l'ensemble des sondages de même nature et dans leur contexte, de sorte à fiabiliser l'identification de l'aquifère ; l'interprétation de ces deux petits sondages diffère de celle-ci, mais nous avons vérifié la compatibilité de l'ensemble).

Ce sondage montre successivement, de haut en bas (en se rappelant que pour les premiers mètres, c'est le talweg que l'on échantillonne, tandis qu'au-delà, c'est une moyenne le débordant) :

- 1.3 mètre à environ 200 $\Omega \cdot m$, qui est de l'arène « sèche », hors aquifère
- 1.6 m d'épaisseur à environ 60 $\Omega \cdot m$. Cette valeur de résistivité intègre les deux accidents très conducteurs visibles sur la section de résistivité, et n'est donc pas à prendre à la lettre. On est là dans la partie non tabulaire du sondage !
- 4 m d'épaisseur à 230 $\Omega \cdot m$, dans de l'arène mais hors saturation
- puis on passe dans l'aquifère à environ 50 $\Omega \cdot m$, sur une bonne épaisseur (au moins 10 m)
- pour finir en profondeur sur un granite bien moins poreux, à plus de 400 $\Omega \cdot m$.

Cette succession hydrogéologique est bien compatible avec l'existence d'un front d'infiltration qui détermine un profil de saturation présentant un minimum à moyenne profondeur.

Prenons en compte maintenant la prospection de polarisation spontanée, la surface SPS déduite de la PS étant représentée sur la Figure 14.

Sur la partie commune, la corrélation entre ces deux méthodes fondamentalement différentes est particulièrement bonne, sauf peut-être au niveau du résistant correspondant au noyau sain présent sur la gauche de la zone commune. Or, à cet endroit où le granit est peu perméable et peu poreux, nous ne pouvons attendre de la PS un signal très significatif, le phénomène d'électrofiltration n'ayant pratiquement plus lieu. Par contre, dans la partie drainante, les profondeurs concordent bien, même si la PS, qui n'a pas subi de filtrage spatial, reste bruitée.

Ce résultat de la PS, obtenu bien après l'interprétation des cartes électriques, conforte l'ensemble de l'interprétation.

La sismique s'est avérée moins utile que les méthodes électriques. Les hodochrones présentent de nombreuses diffractions. Un couple tir direct – tir inverse effectué de haut en bas, en $x=25$, à partir de $y=10$ jusqu'à $y=45$ a donné un modèle compatible, semble-t-il, avec les interprétations qui précèdent avec 600 à 1000 m/s jusqu'à 2 m de profondeur (arène), puis 1560 m/s (arène « presque » saturée ?), mais l'aquifère proprement dit, qui devrait être plus rapide, n'est pas vu (il existe des possibilités qu'une telle couche n'apparaisse pas, elle est alors dite « cachée », et enfin du 4000 m/s à 15 m de profondeur. Nous pensons que ce contexte géologique se prête mal à la réfraction classique et que la sismique, effectuée à titre de curiosité, n'est pas particulièrement pertinente sur ce site.

3.2. Interprétation d'ensemble et discussion géomorphologique.

Nous pouvons conclure sur les points suivants :

- au niveau des crêtes, il existe des noyaux de granit relativement sains, résistant à la désagrégation et à la mobilisation par le ruissellement.
- Au niveau des talwegs, la roche sous-jacente est fortement altérée, poreuse, perméable, drainante, et si la couverture végétale n'était là pour la protéger, il est bien probable que des éléments désagrégés de l'arène seraient entraînés par le ruissellement, produisant un fort taux d'érosion.
- Au sommet de la pente, (comme dans certaines parties basses, mais dans ce cas il y a apport), il existe des « marécages » où des argiles, probablement principalement autochtones, restent accumulées. L'altération a produit des sortes de cuvettes (comme des marmites karstiques) et gagne certainement par la base. Ce système se conserve car lors même de fortes pluies, la topographie détermine un puits de potentiel. On retrouve un « standard » des karsts.

Au vu des résultats, nous pensons que les talwegs perpendiculaires au ruisseau sont plus fragiles, plus érodables, que les crêtes. Ce qui signifierait qu'ils devraient s'approfondir. Toutefois, les cycles thermiques (et le gel en particulier) atteignent plus les crêtes que les talweg, au moins pour deux raisons. D'une part, un isotherme donné (après un brusque refroidissement, par exemple) pénètre plus profondément au niveau des crêtes, car le rapport surface/volume y est plus important qu'au fond des talwegs (ou encore, il suffit de résoudre l'équation de la chaleur sur un relief pour s'en convaincre). D'autre part, la teneur en eau souterraine, qui est plus forte dans les talweg (du fait que l'eau y ruisselle), y détermine une bien plus grande inertie thermique, protégeant des effets du gel.

Il y aurait deux effets antagonistes, l'un creusant les talwegs (et les approfondissant), l'autre attaquant les crêtes (ce qui a l'effet inverse). A une échelle de temps géologique, l'équilibre (ou plus exactement la stationnarité) est sans doute atteinte depuis longtemps, mais doit subir des fluctuations en fonction du climat thermique et pluviométrique.

Si cette hypothèse est exacte, on devrait trouver des taux d'érosions similaires sur les crêtes et au fond des talwegs, au moins lorsque ces structures sont perpendiculaires à l'axe du vallon local.

Remarquons qu'à l'exception du plateau supérieur et du bas de pente, l'arène est pratiquement partout sub-affleurante. On ne peut affirmer observer des dépôts ou du transport (colluvionnement), et il semble que tout matériaux détaché soit très rapidement évacué par le ruisseau.

En terme d'équation, nous pouvons voir si la solution stationnaire correspond à l'établissement stationnaire de l'équation de diffusion : $\Delta h = k \frac{\partial h}{\partial t} = C = \text{constante}$. Pour cela, traçons le laplacien de la topographie, sur la Figure 15. Un extrait de la statistique de la carte du laplacien répond à cette question :

Grid Statistics

Z Minimum:	-0.0089038158729816
Z 25%-tile:	-0.0024053165029831
Z Median:	-0.00080090521188073
Z 75%-tile:	0.0018867482081868
Z Maximum:	0.028384996687314
Z Midrange:	0.009740590407166
Z Range:	0.037288812560295
Z Interquartile Range:	0.0042920647111699
Z Median Abs. Deviation:	0.0019678008501537
Z Mean:	0.00031449957702139
Z Trim Mean (10%):	-8.3946361738223E-005
Z Standard Deviation:	0.0044598412616555
Z Variance:	1.9890184079165E-005
Z Coef. of Variation:	14.180754403216
Z Coef. of Skewness:	1.867935503315
Z Root Mean Square:	0.0044709164679193
Z Mean Square:	1.9989094063112E-005

La moyenne du laplacien est à 0.0003, plus de dix fois plus petit que son écart type qui vaut 0.0044. Ce laplacien mesuré n'est pas significatif : on se perd dans le bruit. A une échelle plus locale, on retrouve sur la carte du laplacien le talweg étudié en détail, vers $x=25$, très bien corrélé avec l'EM31. Mais cette carte ne représente que le laplacien (les creux et les bosses), et ne dit rien sur l'évolution de la topographie.

4. Conclusion

Ce travail révèle qu'il existe un grand degré d'hétérogénéité latérale de l'échelle pluri-métrique à pluri-décamétrique. L'étude des processus d'érosion doit prendre en compte ce fait, d'autant plus que la qualité du terrain peut inverser la corrélation entre taux d'érosion et topographie.

Il oriente également l'échantillonnage à effectuer pour les datations par les cosmonucléides.

Bibliographie pour la PS (Cédric Lanseau)

- [1] Aubert M., Application de la mesure des potentiels électriques de polarisation spontanée (PS) à la reconnaissance des formations superficielles, Colloque GEOFCAN (1997) 121-126
- [2] Aubert M., Yene Atangana Q., Self potential method in hydrogeologic exploration of volcanic areas, Ground-Water 34 6 (1996) 1010-1016
- [3] Descloitres M., Ribolzi O., Le Troquer Y., Variations saisonnières de la résistivité des sols d'une ravine sur un versant sahélien, Colloque GEOFCAN (2001) 25-29
- [4] Ernston K., Scherer H.U., Self-Potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters, Geophysics 51 10 (1986) 1967-1977
- [5] Fournier C., Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area : case history of the Chaîne des Puys (Puy-de-Dôme, France), Geophysical Prospecting 37 (1989) 647-668
- [6] McNeill J.D., Electrical conductivity of soils and rocks, GEONICS Technical Note TN-5 1980
- [7] McNeill J.D., Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, GEONICS Technical Note TN-6 1980
- [8] Reynolds J.M., Spontaneous (Self) Potential methods, in : An introduction to applied and environmental Geophysics, John Wiley & Sons, 1997, pp.491-521

Contacts :

Nicolas FLORSCH, UMR 7619 « Sisyphé », case 105, UMPC, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, florsch@ccr.jussieu.fr

Jean-Christophe MAURIN, CLDG, Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex, jcmaurin@univ-lr.fr

Ville d'Aizenay

Site de La Proutière



Topographie du site UTM fuseau 30 sur ED50

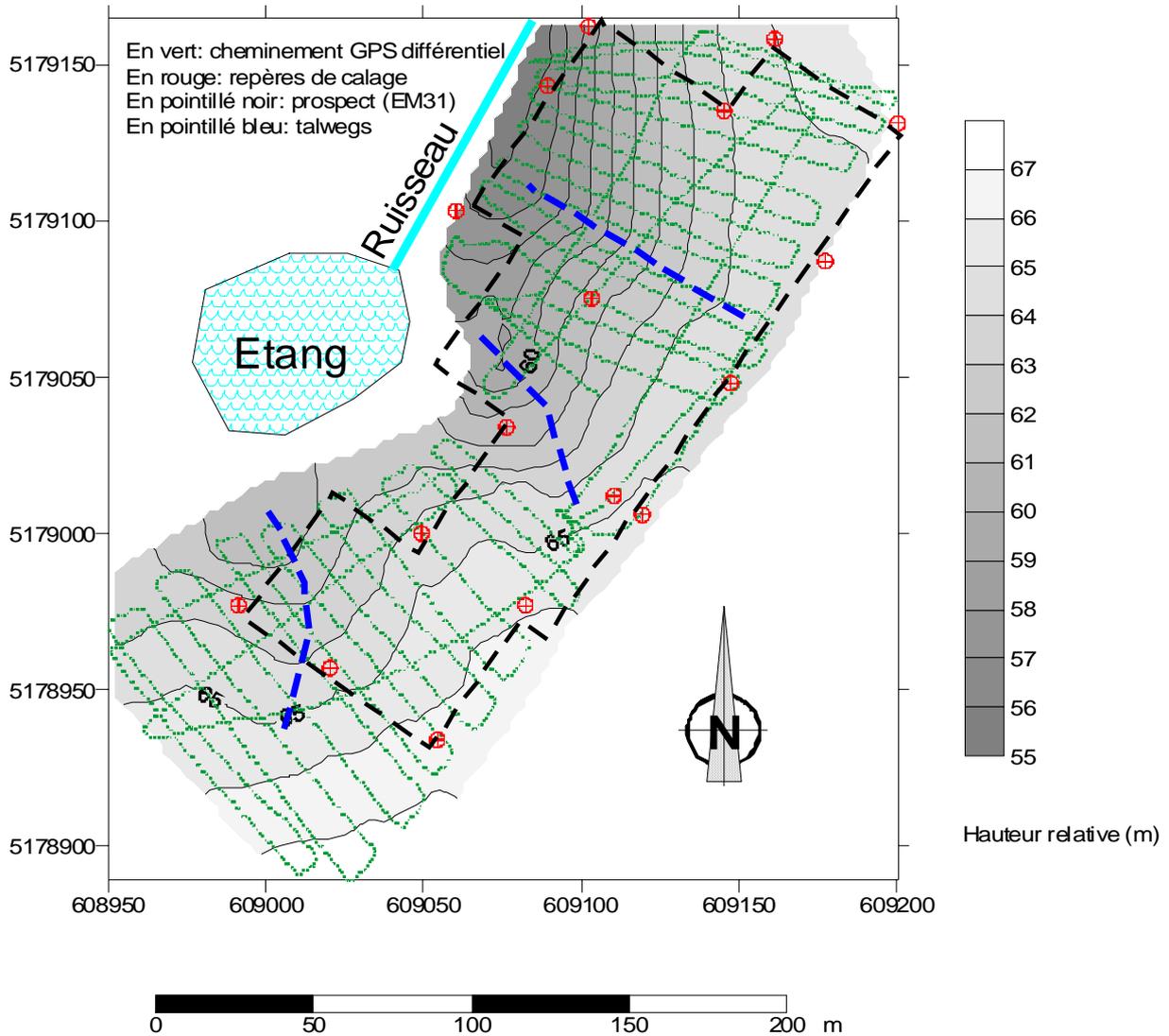


Figure 1: localisation du site et topographie

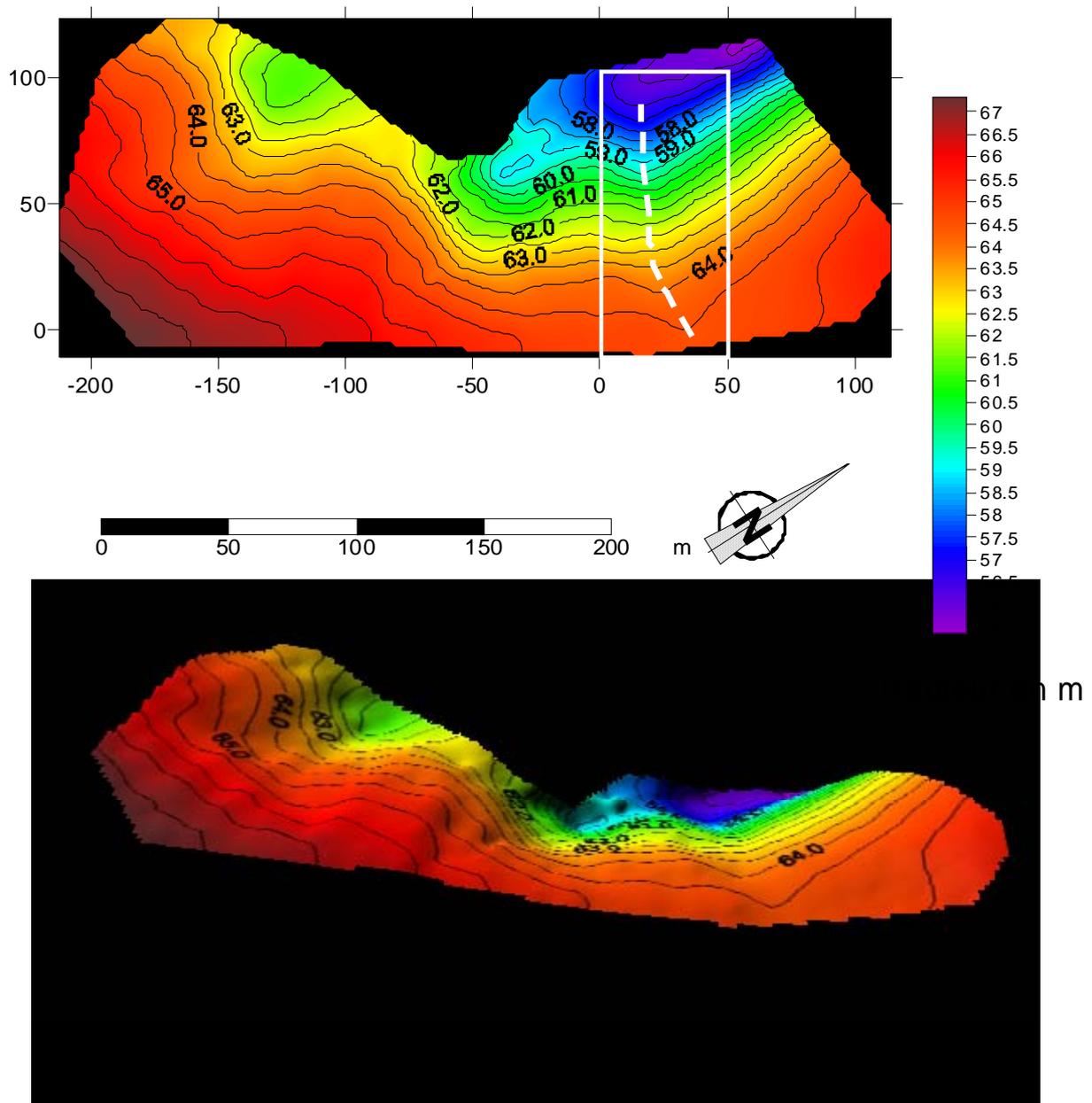
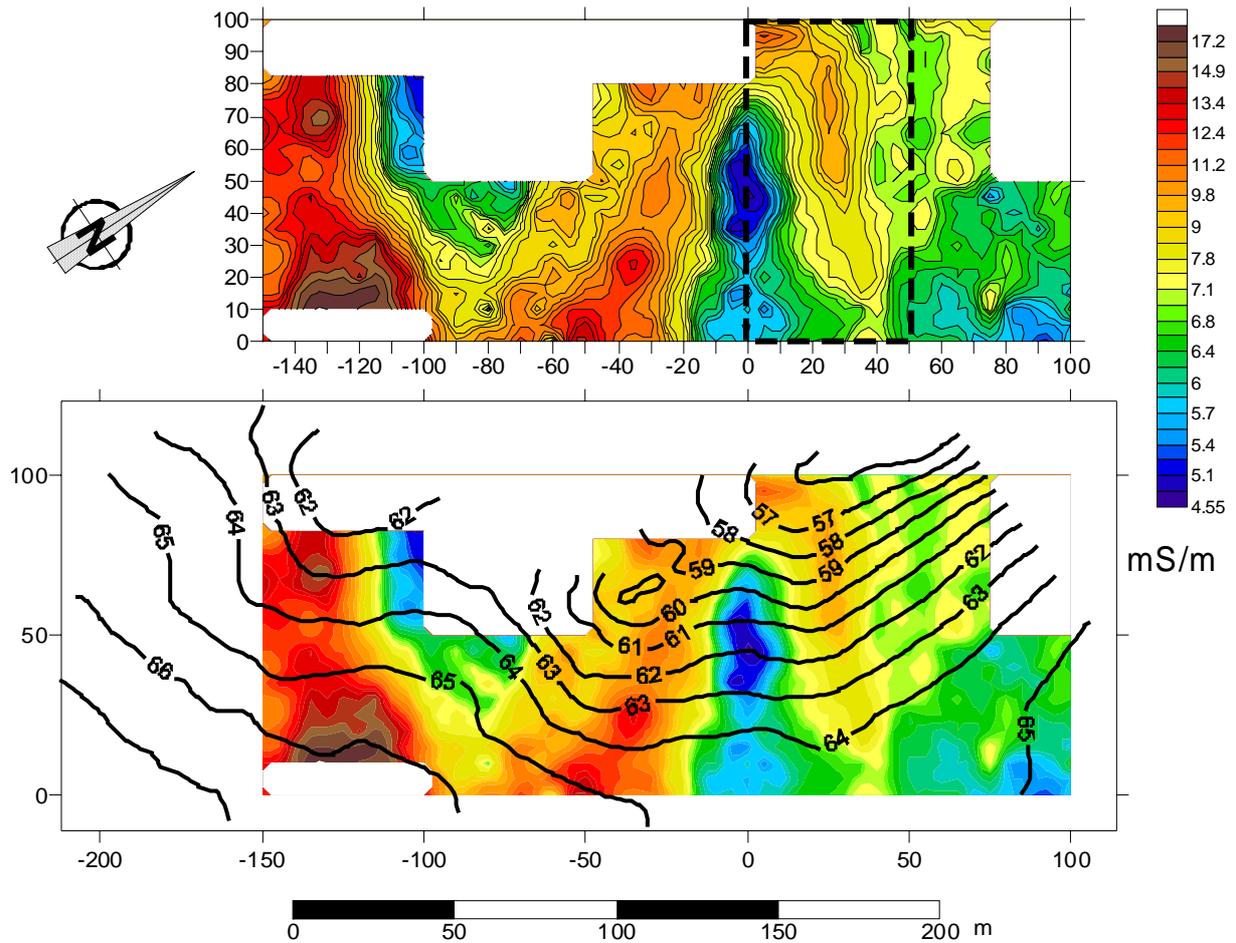


Figure 2: topographie du site.

Le rectangle blanc entoure la zone étudiée le plus en détail.

Le pointillé correspond au talweg.



On note d'emblée une assez bonne correspondance entre les talwegs et les zones conductrices (en rouge) ainsi qu'entre les crêtes et les zones résistantes (en bleu)

**Figure 3: Carte de conductivité EM31 (couleur)
En bas, correspondance avec la topographie (au trait)**

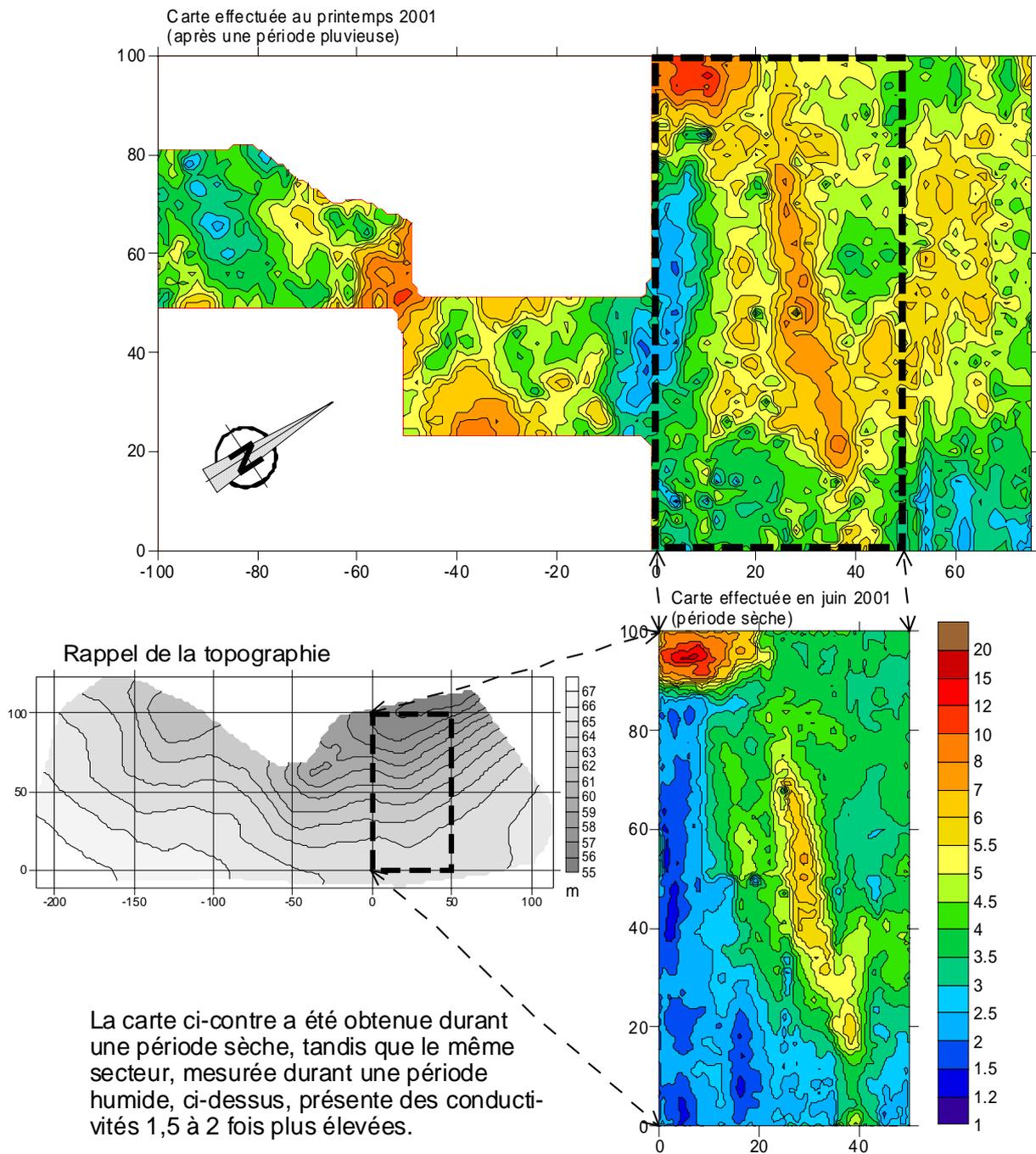
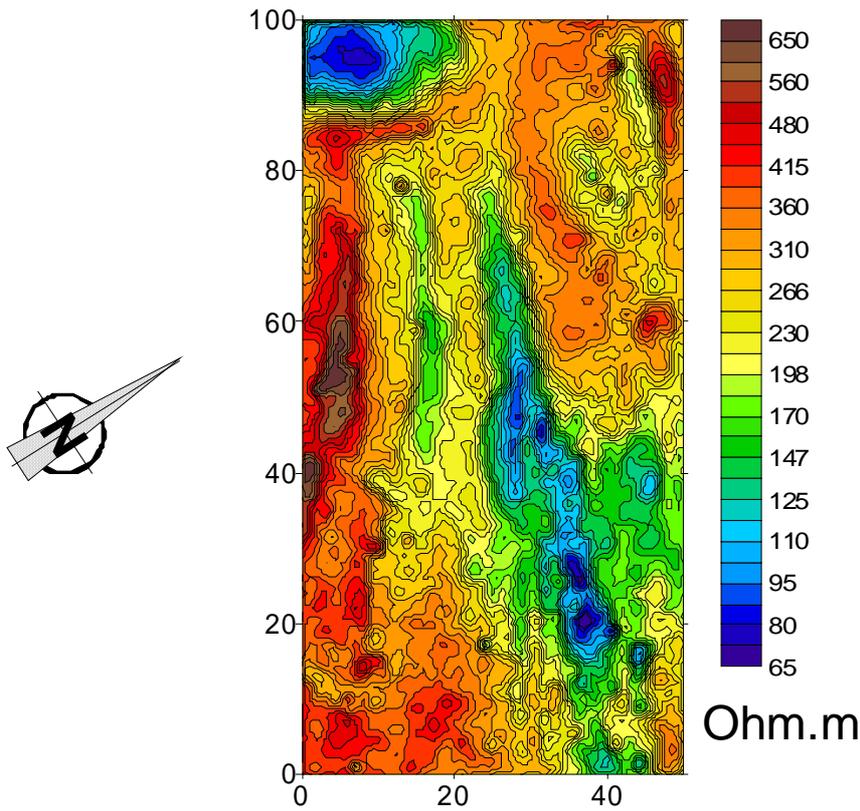
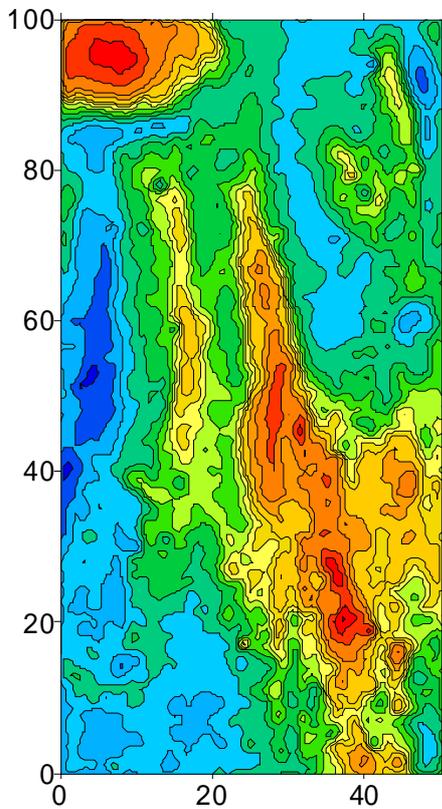


Figure 4: cartes de conductivité EM38

Carte pôle-pôle exprimée en Ohm.m



Carte pôle-pôle exprimée en mS/m



Carte EM38 en mS/m

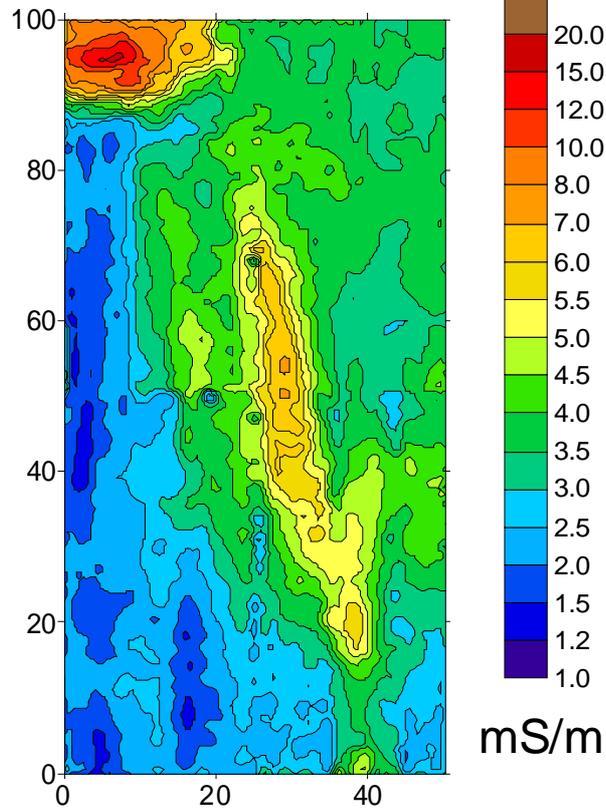


Figure 5: traîné pôle-pôle et comparaison avec l'EM38

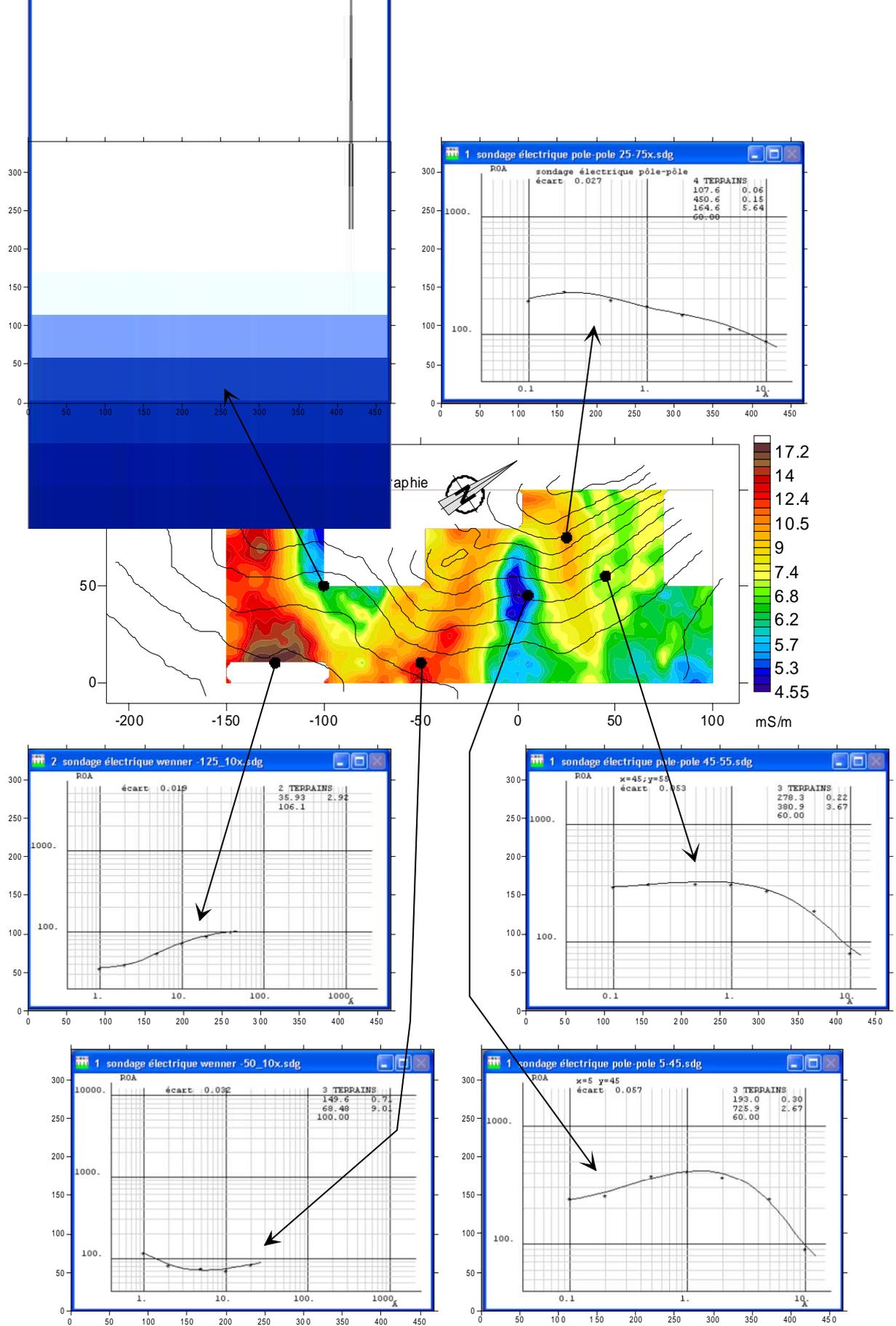


Figure 6: sondages électriques représentatifs (pôle-pôle ou Wenner)

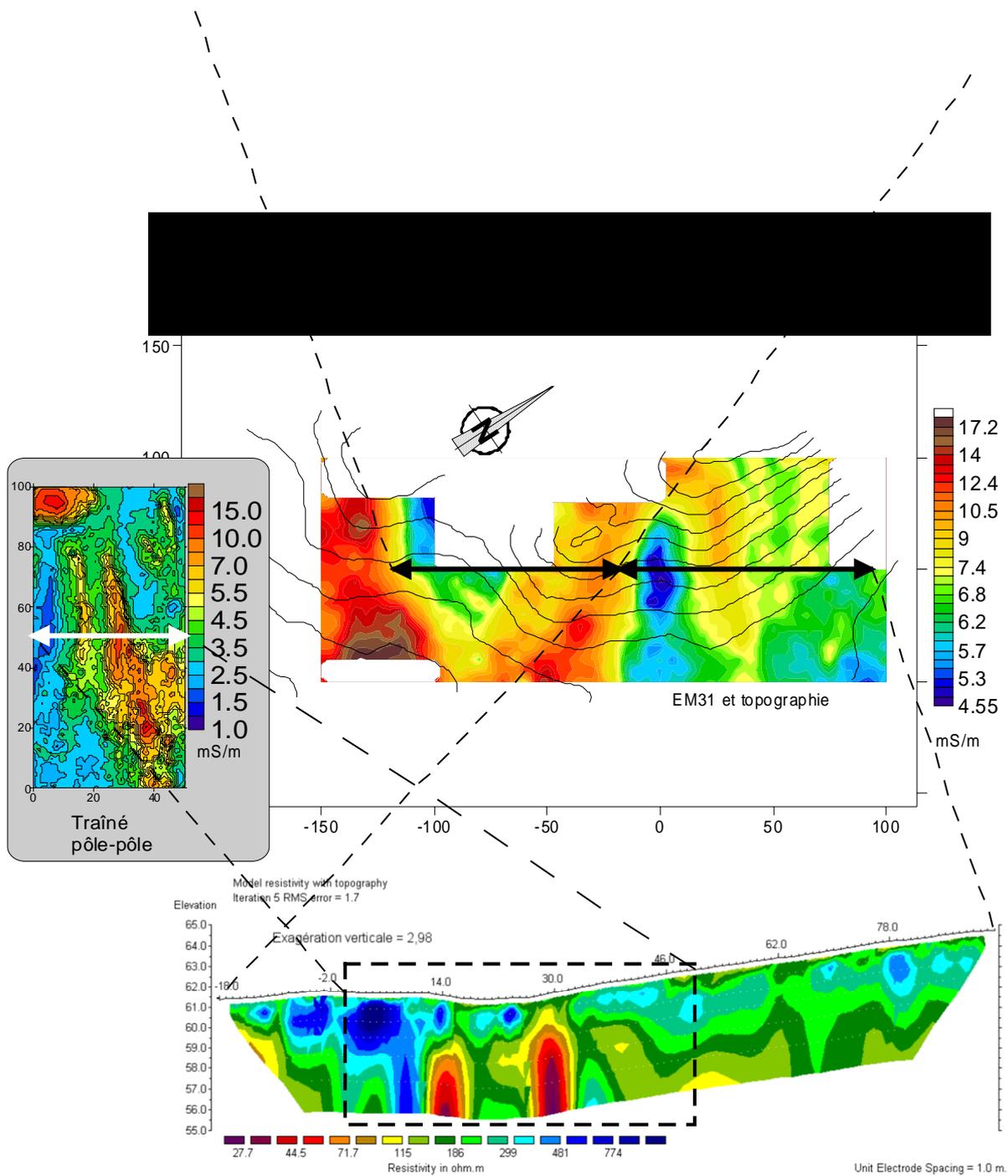


Figure 7: panneaux inversés (RES2DINV avec topo)

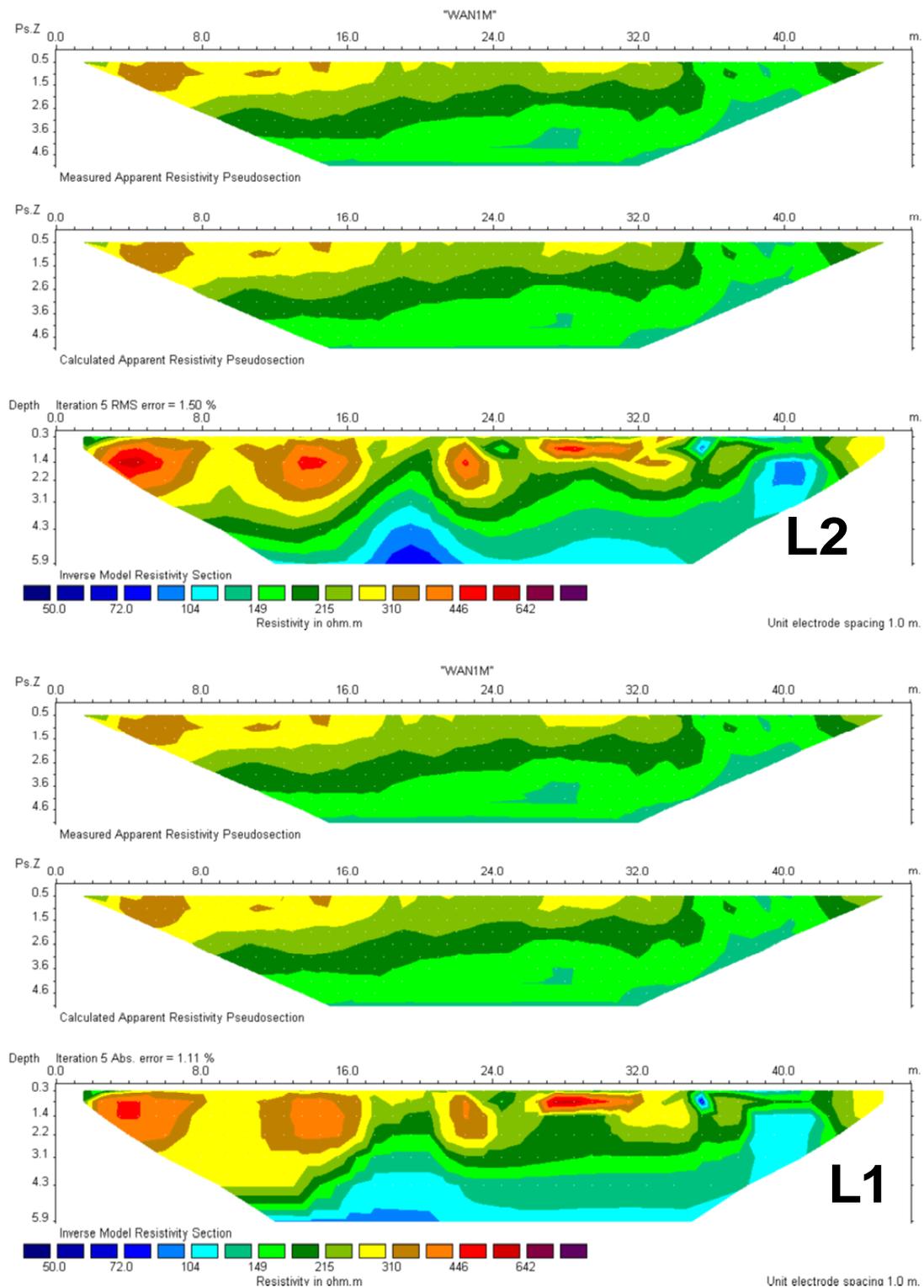


Figure 8: Comparaison de deux méthodes inverses (norme L2 et norme L1). Sur ce profil, le dénivelé, faible, n'est pas représenté mais a été pris en compte lors de l'inversion. Cette section correspond à la partie supérieure de la zone détaillée, plus exactement en $y=0$, pour x allant de 0 à 47.

4-7 mars 2002
maille 5mX5m
(extrait)

10 mars 2002
maille 2m X2m

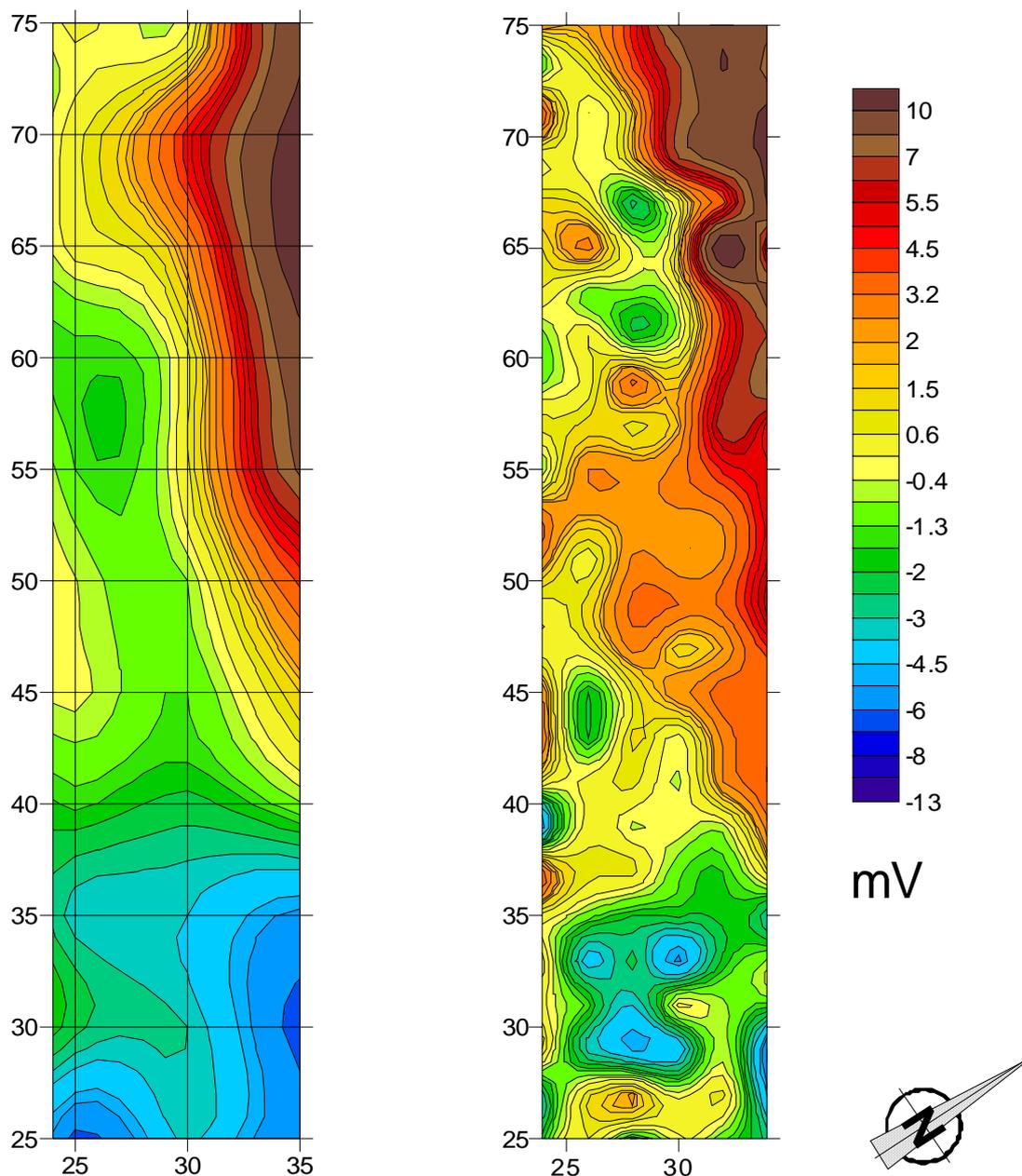


Figure 9: Comparaison d'un extrait de la carte réalisée en 5 m avec la carte réalisée quelques jours plus tard en 2m. Aux effets d'échantillonnage près, on peut estimer que la reproductibilité est bonne et que le signal mesuré est représentatif.

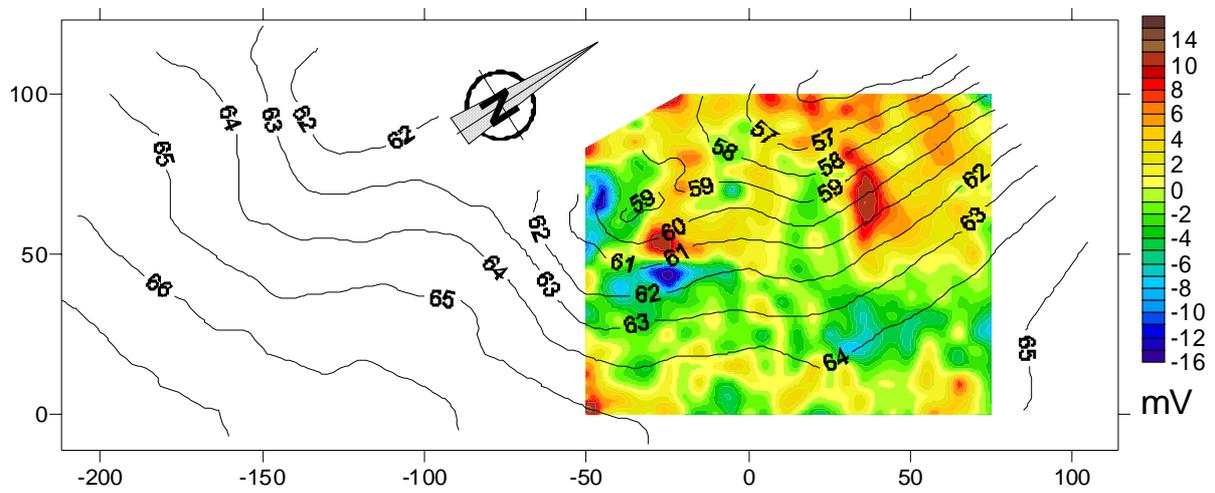
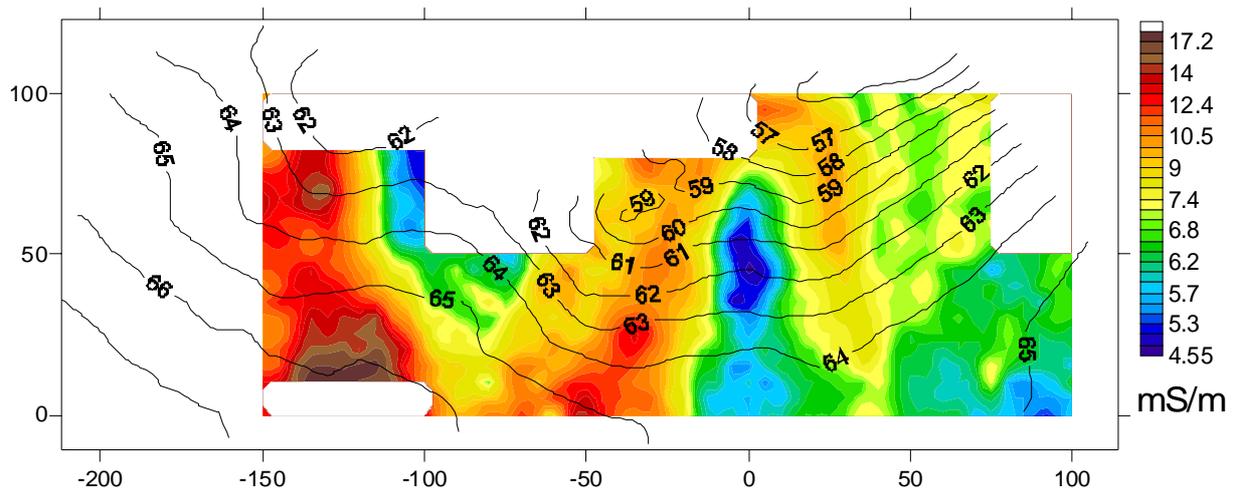


Figure 10. Carte PS, en bas avec rappel de la topographie. En haut, pour comparaison, la carte de conductivité EM31.

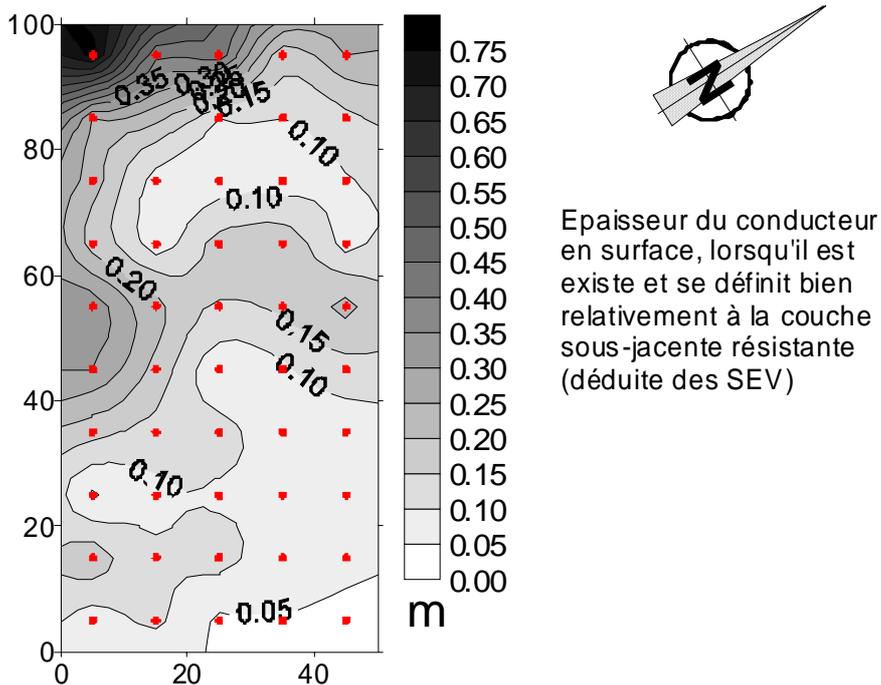
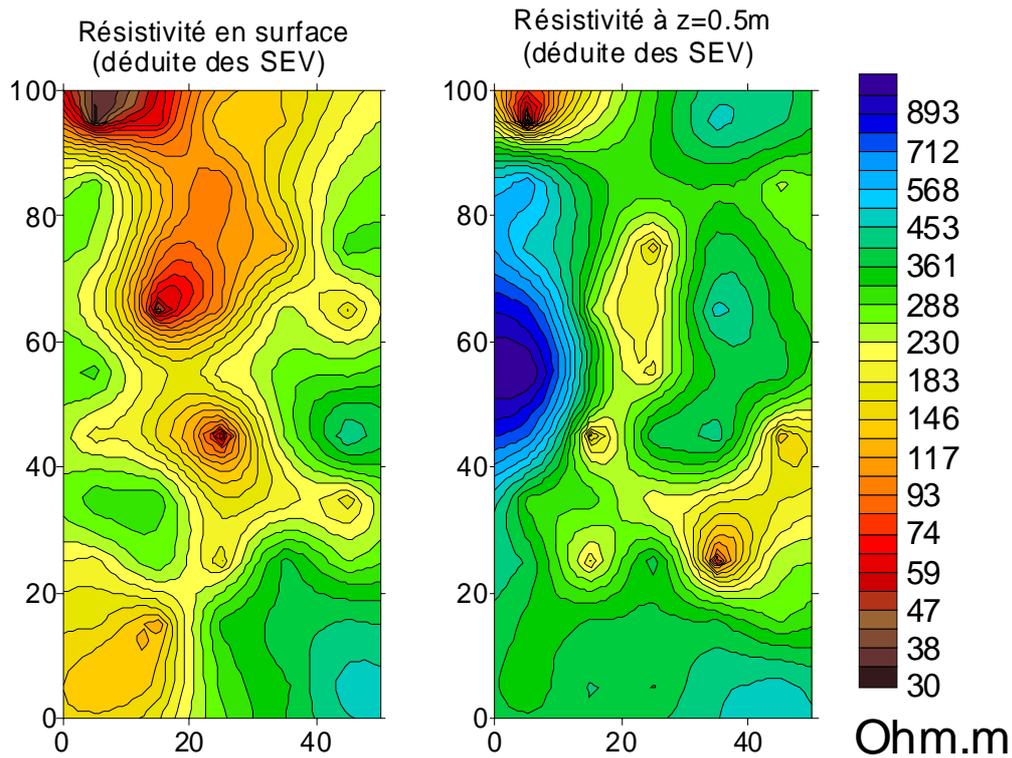


Figure 11: Cartes électriques de la surface et à 0,5 m de profondeur. En N&B, épaisseur du conducteur superficiel (terre arable). Les points rouges représentent le maillage des sondages électriques.

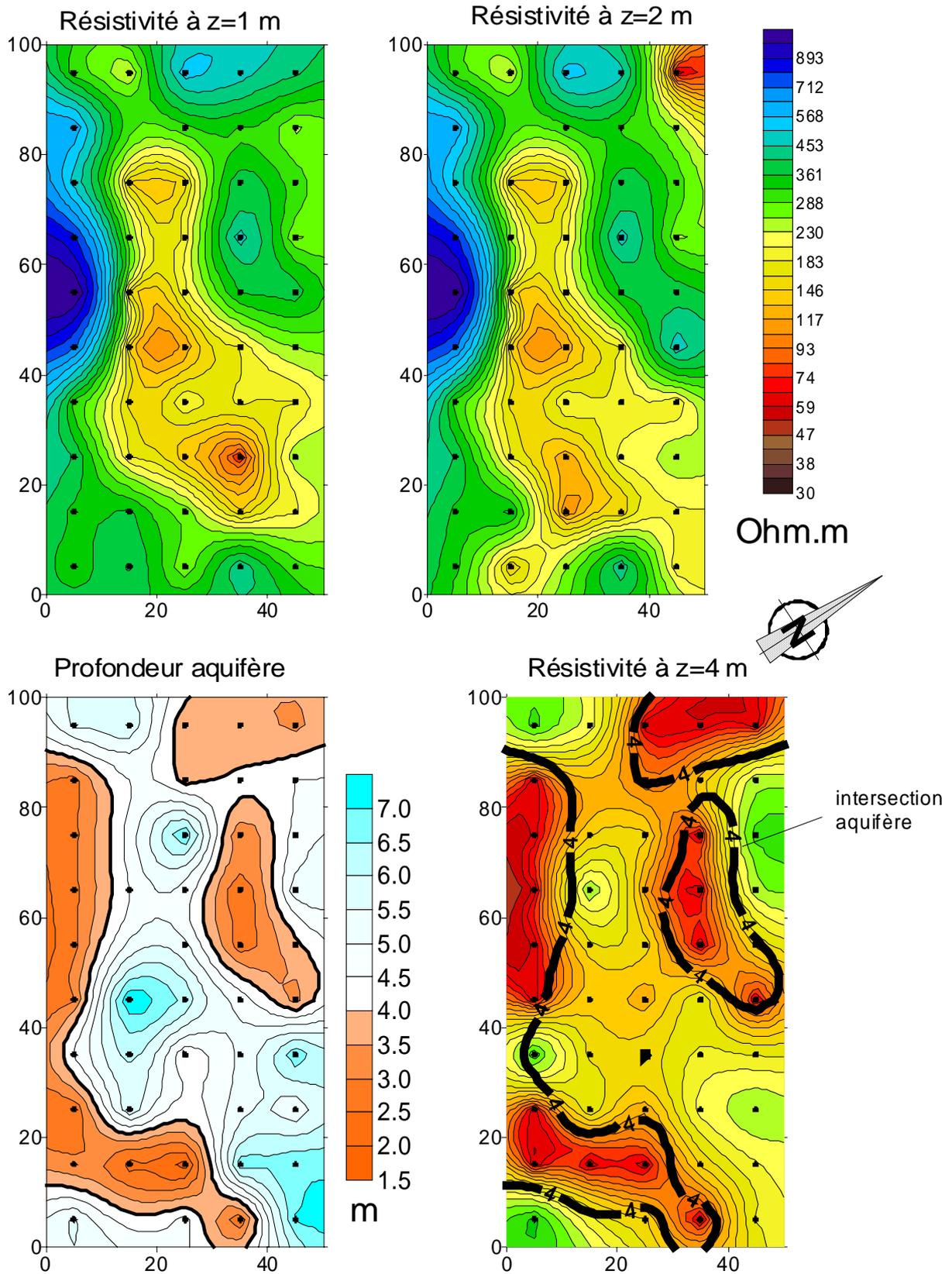


Figure 12: Résistivités déduites des sondages électriques et profondeur de l'aquifère

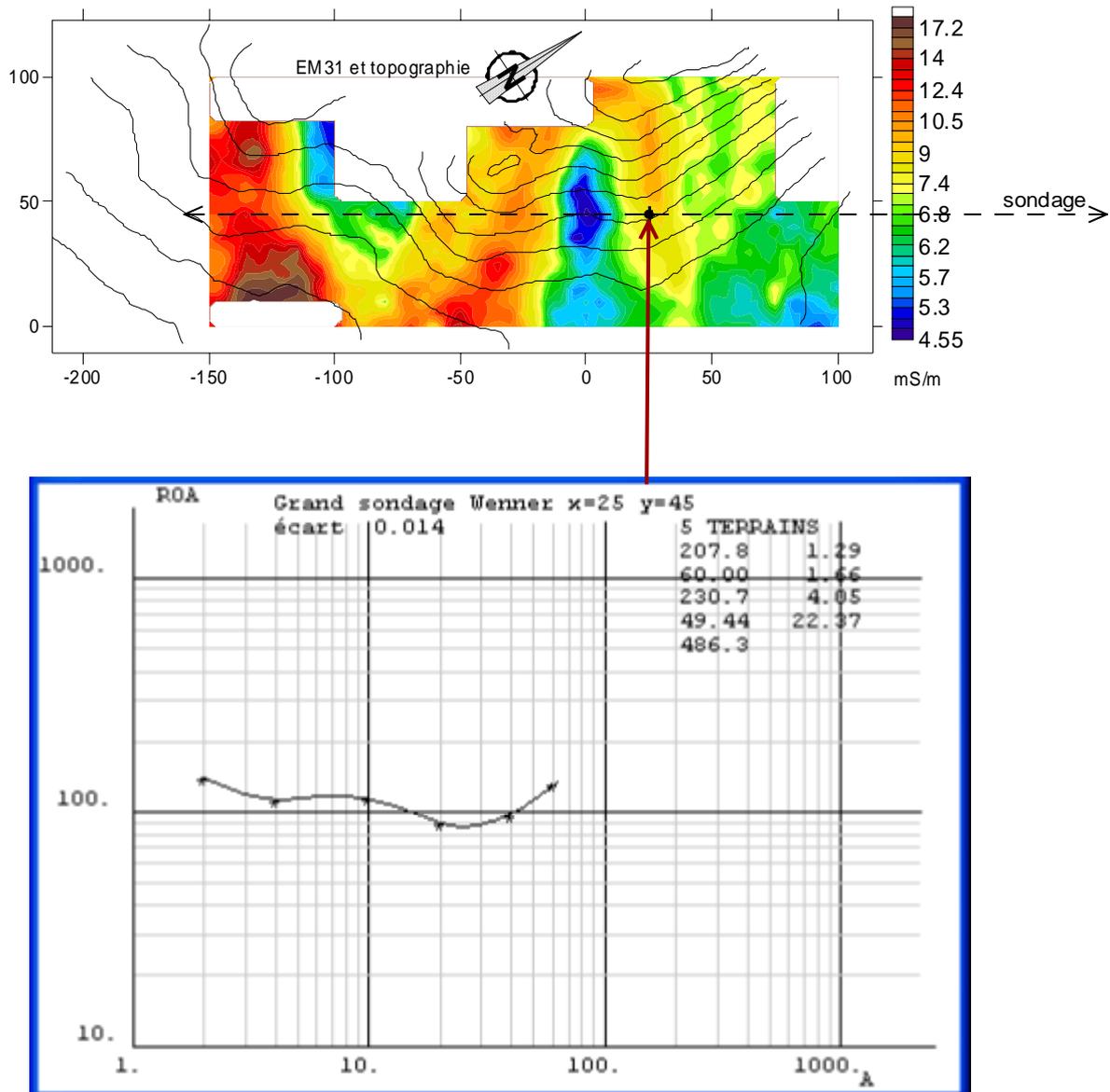
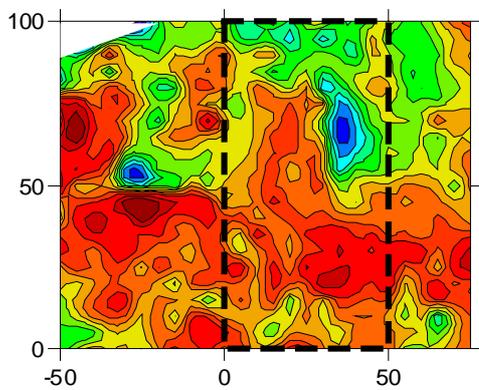
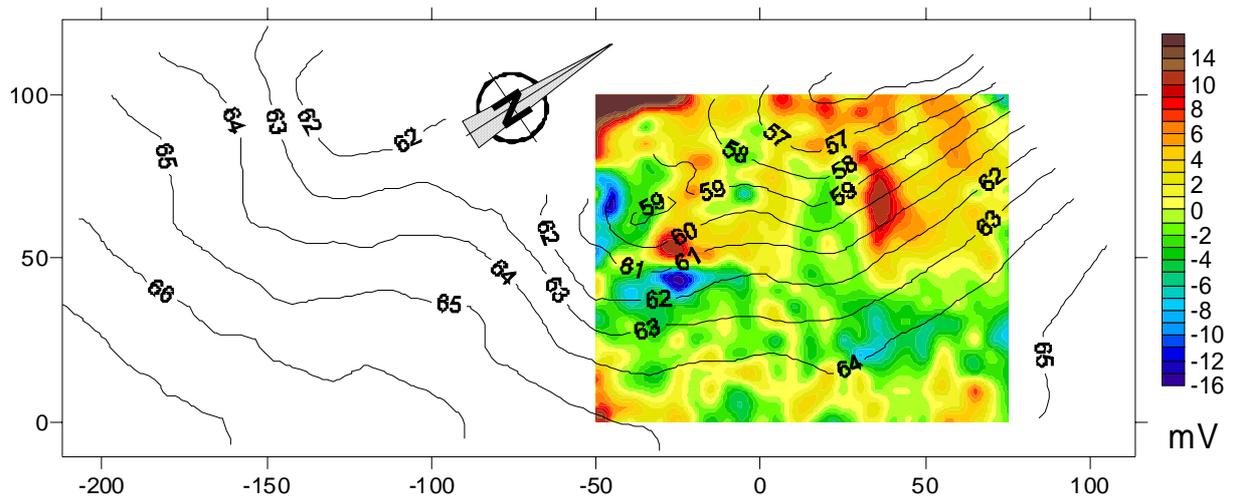
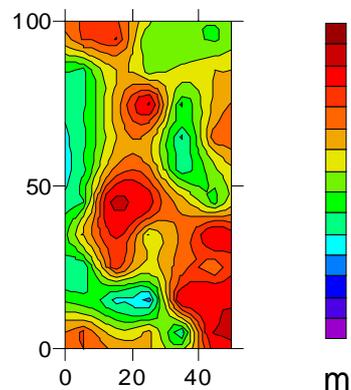


Figure 13: grand sondage Wenner ($AB_{max}=180$ m)
 On note bien le passage à l'aquifère vers 7m de profondeur, soit environ encore 2 m au-dessus du niveau drainant du ruisseau. Le granit sain n'est retrouvé que bien plus profond.

Noter que les couches de ce sondage sont sujettes aux ambiguïtés d'équivalence, en particulier pour l'aquifère.



Surface SPS, c'est-à-dire
profondeur de l'aquifère vue
par la polarisation spontanée



Profondeur de l'aquifère
par les sondages électriques

Figure 14. Carte PS, en haut, avec rappel de la topographie. En bas, la "surface SPS" déduite, et, pour comparaison sur la zone détaillée, la profondeur de l'aquifère déterminée par les SEV.

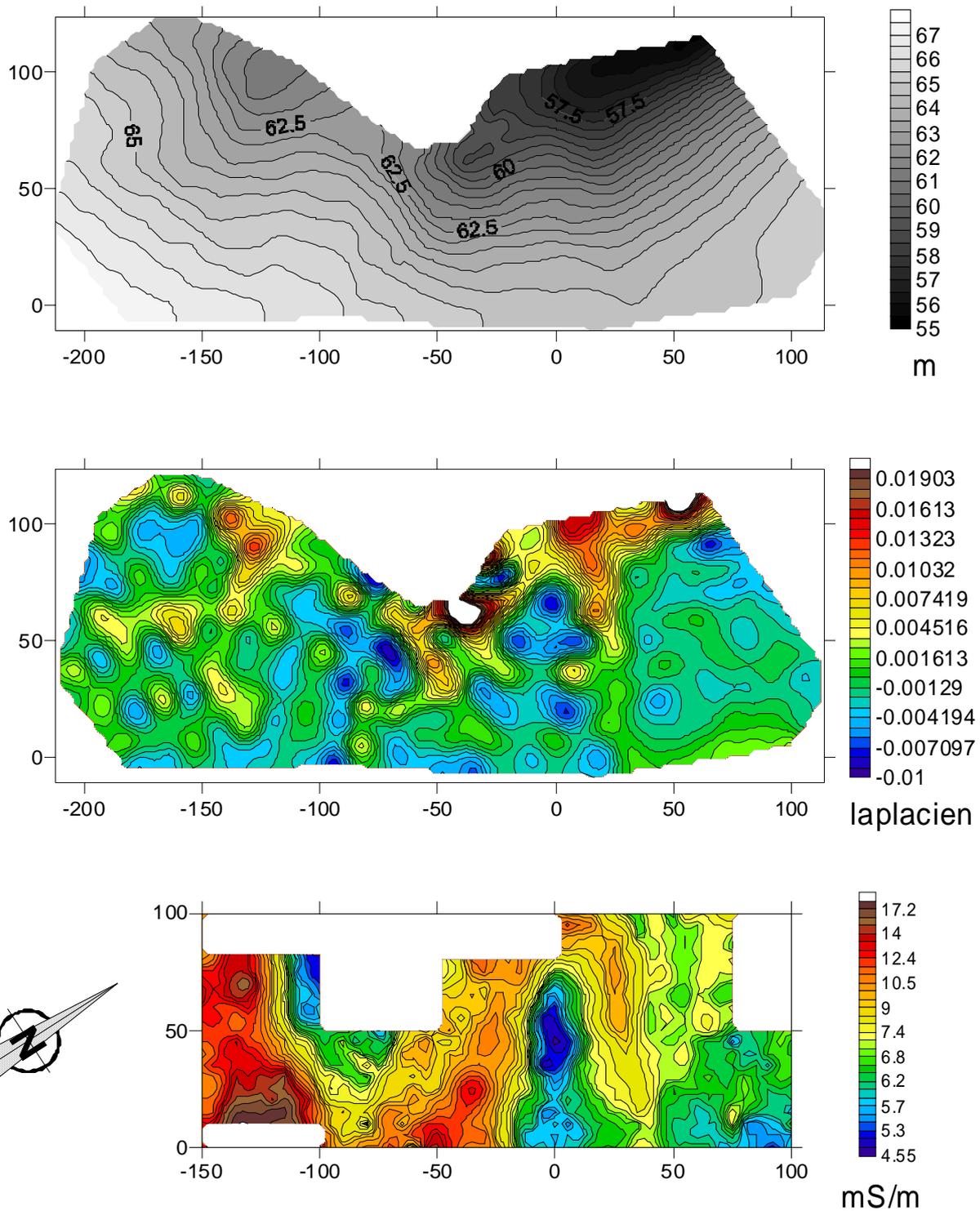


Figure 15: en haut, rappel de la topographie. Au milieu, le Laplacien, après un léger filtrage passe-bas de sorte à éliminer les artefacts de l'interpolateur. En bas, pour rappel, la carte EM31.

ANNEXE : SONDAGES ELECTRIQUES DE LA ZONE DETAILLEE

Le dispositif utilisé est un pôle-pôle.

