

Reconnaissance des digues de protection contre les crues du bassin de la Loire par méthodes géophysiques sismique et électrique pour la caractérisation de l'aléa karstique

(Projet de service public DREAL centre-BRGM)

K. Samyn, A. Bitri, F. Mathieu, A. Nachbaur, L. Closset, D. Lequin

Service Risques-Unité Risques Sous-sol et Cavités

mardi 15 novembre 2011

Introduction

Objectifs du projet

- Elaborer une méthodologie permettant de déterminer une probabilité de présence de karsts sous les digues de la Loire

- Caractériser l'hétérogénéité des digues de la Loire

- Evaluer le niveau de susceptibilité de présence de karsts

- Orienter les futurs actions complémentaires envisageables sur les digues de la Loire

Phasage du projet

- **Collecte exhaustive des données géologiques et hydrogéologiques disponibles le long des levées (tranche 1)**

- **Élaboration d'une carte de probabilité de présence de karsts à l'échelle du bassin (tranche 1)**

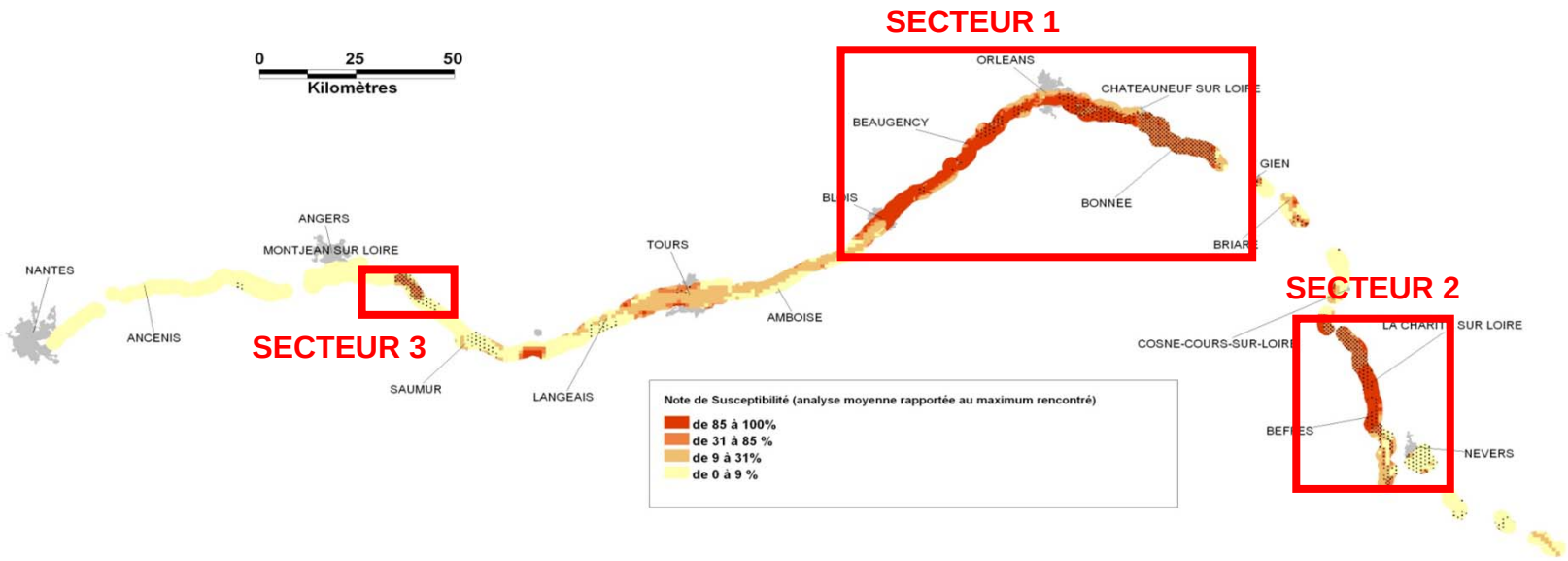
- **Etude spécifique par méthodes géophysiques sismique MASW et électrique Ohmmapper sur un secteur le plus problématique et révision de la carte de susceptibilité de présence établie. Il en découlera la définition des actions complémentaires pouvant être envisagées sur les secteurs montrant les évaluations de risques les plus élevés (tranches 2 et 3)**

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Introduction (2)

> **Carte de susceptibilité de présence d'évènements karstiques (Tranche 1):**

Nature géologique : ***les karts se forment préférentiellement dans les horizons géologiques les plus sensibles au phénomène de dissolution.***
Perméabilité : ***La capacité de circulation de l'eau dans un horizon géologique***
Epaisseur du recouvrement : (formations alluvionnaires + superficielles) ***: Plus le recouvrement alluvionnaire est important, plus il sera en mesure de combler les vides karstiques éventuels et atténuer ainsi l'effet à l'aplomb de la levée.***



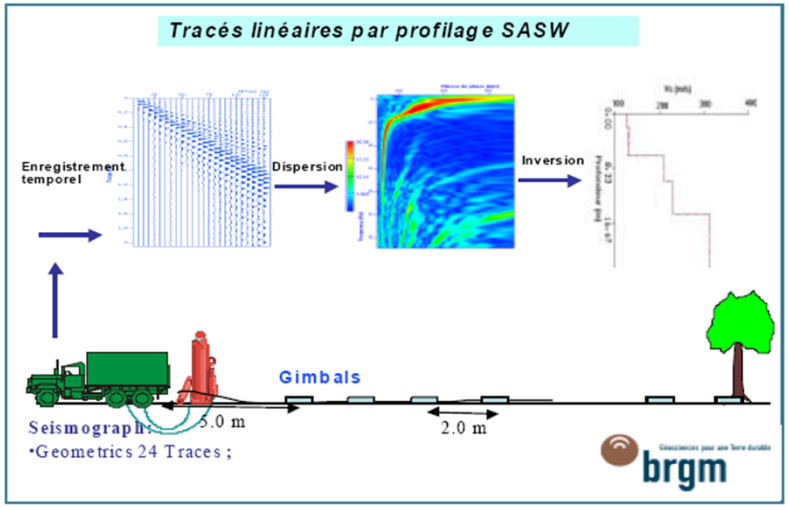
La carte de susceptibilité de présence sera revue en tenant compte des résultats de la phase d'investigations géophysiques (tranche 3)

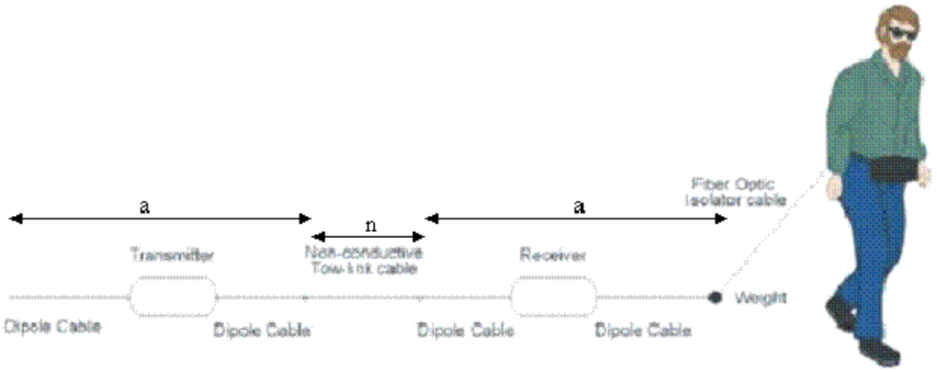
Géosciences pour une Terre durable
brgm

Principes des méthodes géophysiques

> La méthode sismique MASW permet de déterminer le champ de vitesse de cisaillement des ondes (Vs) le long d'un profil, en fonction de la profondeur, à partir de la dispersion des ondes de surface. Un tel profil permet d'imager les zones de faibles Vs, associées à des zones de faibles propriétés mécaniques telles que les zones décompactées, altérées, pouvant être dues à la présence de karst. Cette méthode permet l'investigation des 30 premiers mètres environ.

> La méthode de tomographie électrique est utilisée pour rendre compte des variations de résistivité le long d'un profil. La méthode la plus simple est constituée de la juxtaposition des sondages électriques à un pas régulier. Des méthodes spécifiques comme la méthode Ohmmapper ont cependant été mises au point pour réduire les coûts de mise en œuvre. Cette méthode permet l'investigation des 8 premiers mètres environ.





Géosciences pour une Terre durable
brgm

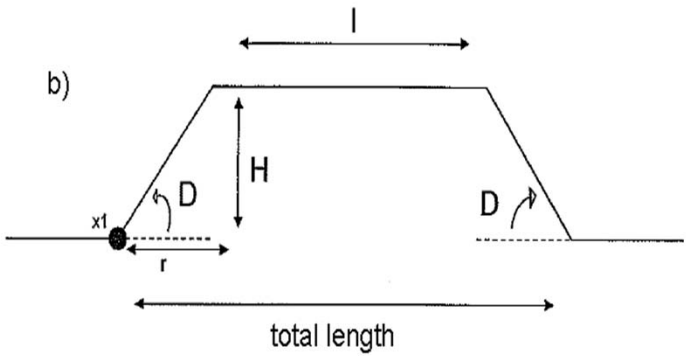
Effet de la topographie dans la prospection MASW:
Modélisation 3D de propagation d'ondes élastique

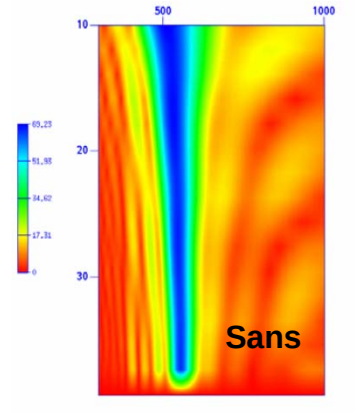
a)

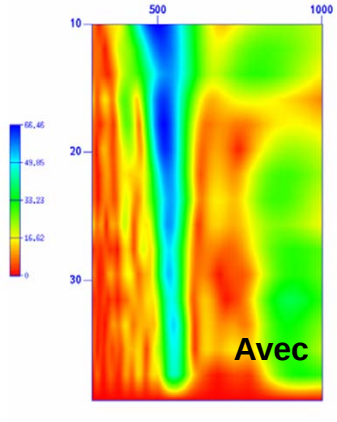


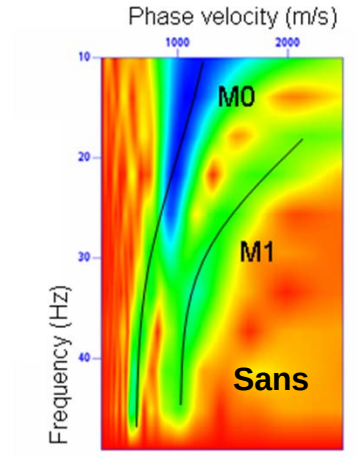
(Photo: BRGM)

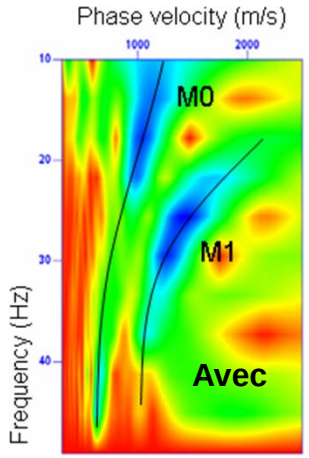
b)











- Bitri et al., Geophysical research abstract, *EGU General assembly 2010*
- Karl et al., *NSG 2011*

Diagrammes de dispersion d'un milieu homogène et hétérogène sans et avec topographie

Géosciences pour une Terre durable
brgm

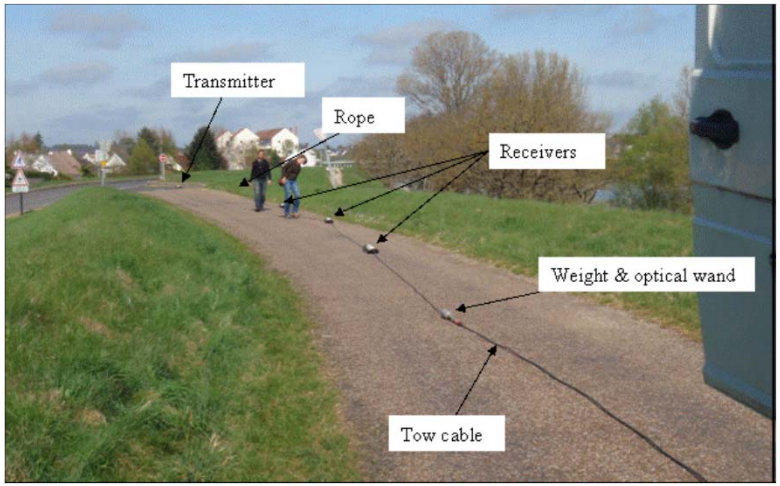
Mise en œuvre (1)



(Photo: BRGM)

- MASW:
  - Centrale d'acquisition Geometrics Geode 24 traces
  - 24 géophones ABEM 10 Hz
  - Inter-trace 2 m
  - Distance entre tir sismique 10 m
  - Source électronique GISCO de type chute de poids
  - Dispositif tracté par un véhicule 4X4
  - Profil géoréférencé en début et fin et projection sur le tracé

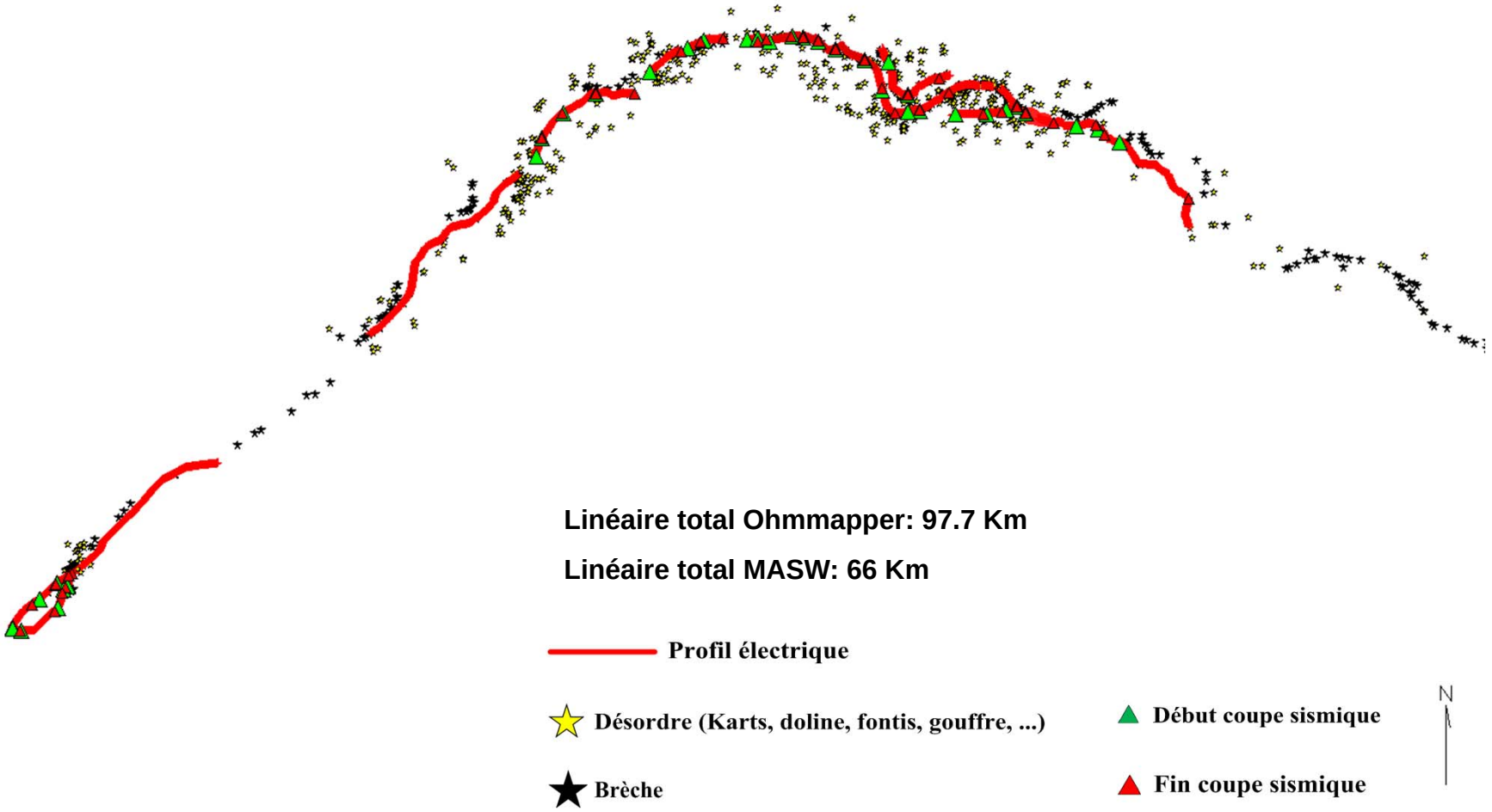
- Ohmmapper:
  - Centrale d'acquisition et antennes Ohmmapper émettrice et réceptrice (Geometrics inc.)
  - Longueur des dipôles 10 m
  - Distances émetteurs-récepteurs 5, 10, 15, 20 m
  - Dispositif tracté par un véhicule 4X4 ou transporteur à chenilles selon conditions de terrain
  - Acquisition subcontinue (mesure chaque 1 m) à l'allure de 3 Km/h environ avec enregistrement GPS



(Photo: BRGM)

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mise en œuvre (2)



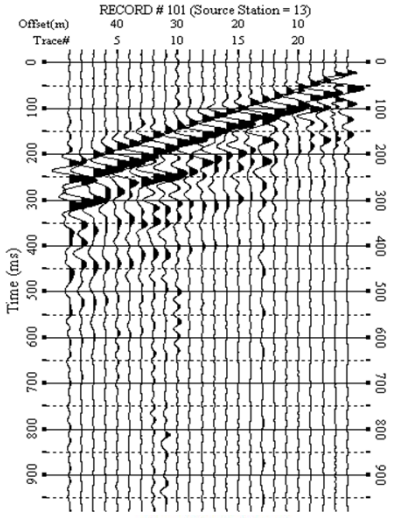
Géosciences pour une Terre durable
brgm

Traitement (1)

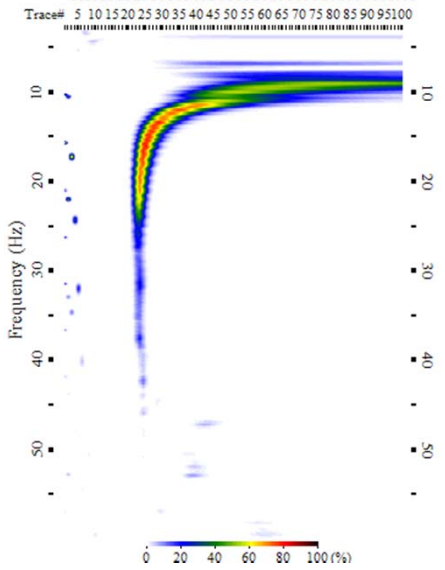
> MASW:

- acquisition d'un tir sismique (1)
- calcul du diagramme de dispersion (variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence) (2)
- digitalisation de la courbe de dispersion
- inversion de la courbe de dispersion afin d'obtenir un modèle 1D de vitesse de cisaillement Vs(z). Pour cette étape, un modèle initial est estimé empiriquement, puis un algorithme de type moindre carré amortis assure la convergence vers la meilleure solution constituant le modèle final (RMSE < 10 m/s) (3)
- interpolation de tous les profils 1D de Vs(z) le long du tracé pour obtenir un profil 2D de Vs(z)

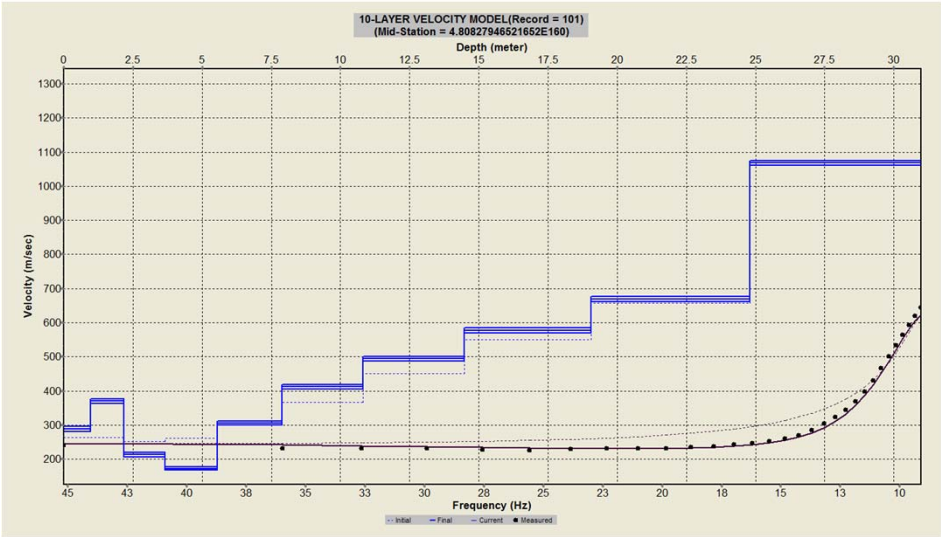
(1)



(2)



(3)

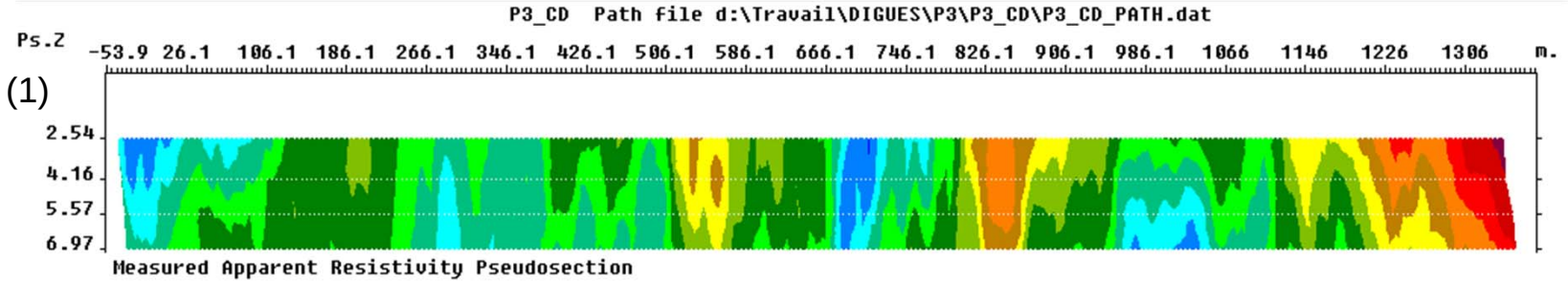


Géosciences pour une Terre durable
brgm

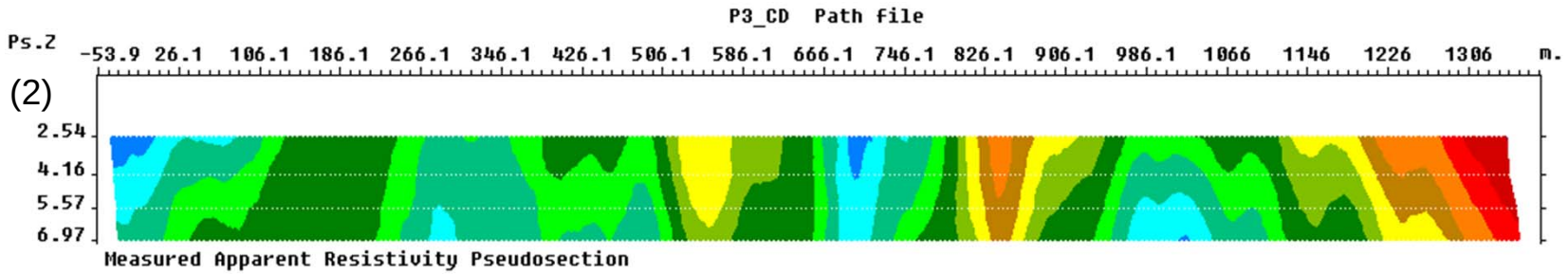
Traitement (3)

> Ohmmapper:

- Traitement des données avec le logiciel MagMap2000 (Geometrics inc.) et obtention de pseudo coupes de résistivité apparente (1)



- Correction et filtrage des coupes avec le logiciel X2ipi (Multi-electrode data processing, Moscow University) (2)

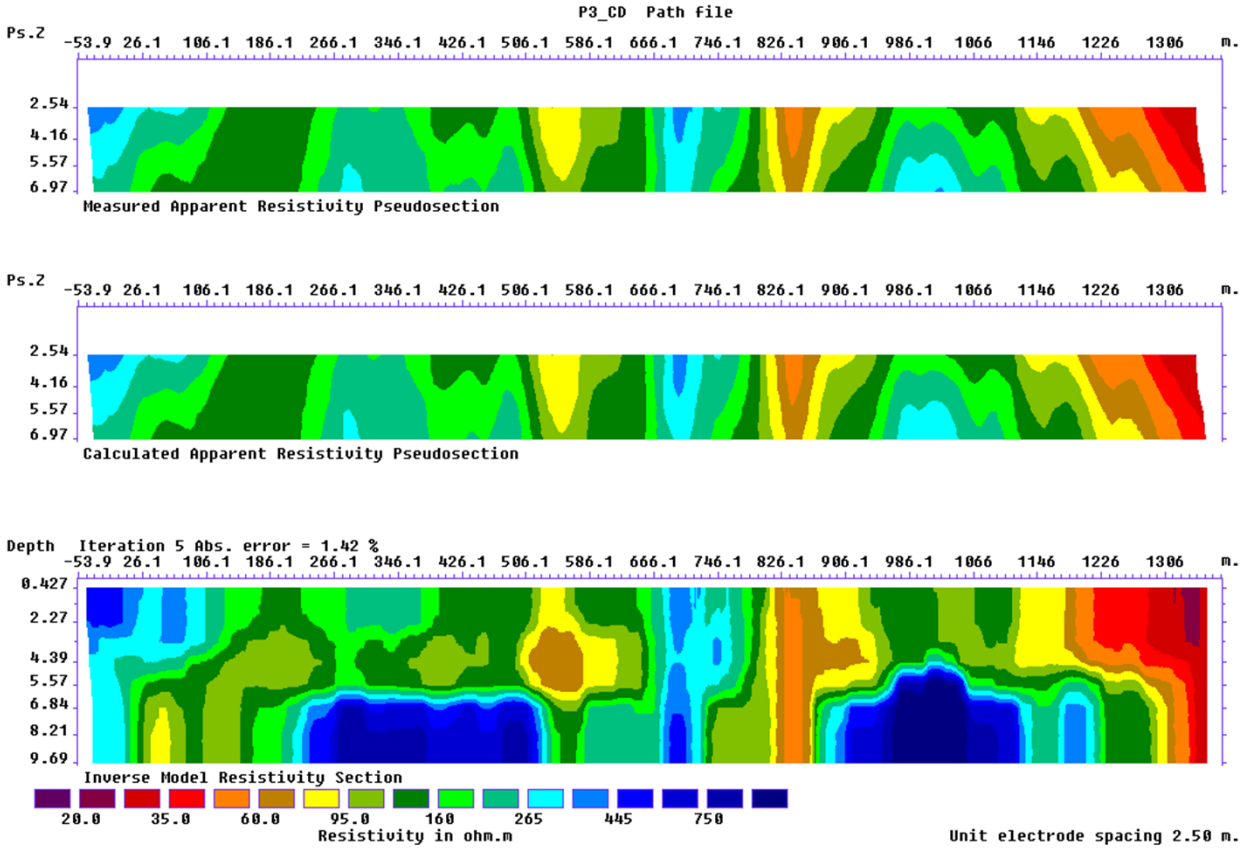


Géosciences pour une Terre durable
brgm

Traitement (4)

- Inversion 2D de la pseudo coupe de résitivité apparente filtrée avec le logiciel RES2DINV (2D resitivity and IP inversion Geotomo Software, Malaysia) et obtention de coupes de résistivité vraie tronquées à z=1 et 7 m (3); 1 % < erreur absolue des inversions < 4 %

(3)



Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (1)

> Ohmmapper:

SR3-SR1-SD32 LR Blois

0-1.5 m: Sable graveleux

1.5-9.5 m: Argile marron

Sondage destructif SD4 LR Blois

0-1.7 m: Sable graveleux

1.7-5.6 m: Argile sableuse

5.6-11.2: Sable graveleux

Sondages pressiométriques SP1-2 LR Blois

0-7.6 m: Sable limoneux

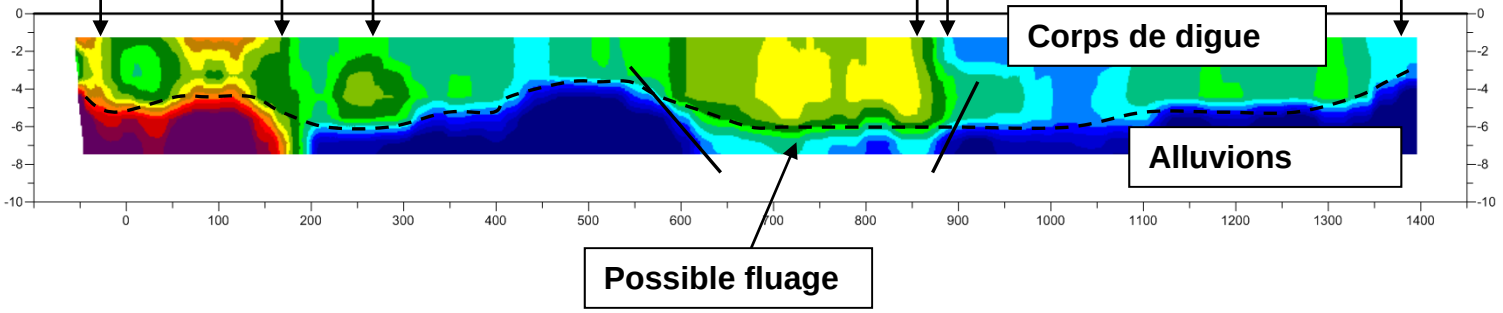
7.6-9.5 m: Sable graveleux

Sondage tarière LR Blois

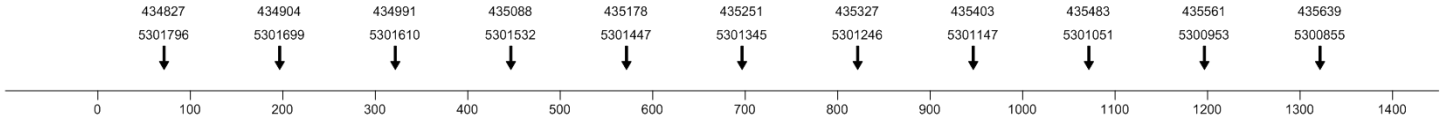
0-9.5 m: Sable graveleux

OhmMapper

Coupe de résistivité inversée



Coordonnées WGS84-UTM 31 en fonction de la distance le long du profil (en m)



Echelle de résistivité en ohm.m



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Interprétation (2): Aléa superficiel

Profil	Corps de digue						Base de la digue (profondeur max 8m/sommet de la digue)						
	Abscisses	Hauteur moyenne (m)	Résistivité (ohm.m)	Lithologie	Interprétation	Corrélations BD	Abscisses	Epaisseur alluvions (m)	Résistivité (ohm.m)	Lithologie	Interprétation	Corrélation BD	Indice de susceptibilité karstique
P2-EF	-1950/-1880	?	60-100	SA a^+			-1950/-1670	5.5 à 10	25-75	A			0
	-1880/-1720	?	160-350	SA s^+ + SG			-1670/-1620	5.5 à 10	>400	SG	fluage vers karst possible		1
	-1720/-1625	?	>400	SG	colmatage brèche		-1620/-1330	5.5 à 10	25-100	A			0
	-1625/-250	?	160-350	SA s+ + SG			-1330/-1280	5.5 à 10	100-160	SA a^+	fluage vers karst possible		1
	-250/-20	?	200-400	SG			-1280/-1025	5.5 à 10	25-100	A			0
							-1025/-990	5.5 à 10	100-160	SA a+	fluage vers karst possible		1
							-990/-770	5.5 à 10	25-100	A			0
							-770/-610	5.5 à 10	100-160	SA a+	fluage vers karst possible		1
							-610/-250	5.5 à 10	75-100	A			0
							-250/-20	5.5 à 10	>350	SG			0
P2-CD	-1230/-575	4 à 5	125-350	SA s^+ + SG			-1230/-575	5.5 à 10	>400	SG			0
	-575/-180	6.5	75-265	SA	dépression/paléo-chenal		-575/-180	5.5 à 10	160-40	SA s^+ + SG	fluage vers karst possible		1
	-180/50	2.5 à 4	125-350	SA s^+ + SG			-180/50	5.5 à 10	>400	SG			0
P2-AB	-725/-230	3 à 4.5	125-350	SA s^+ + SG			-725/50	5.5 à 10	>400	SG			0
	-230/-170	3.5	100	SA	colmatage brèche								
	-170/20	2.5	125-350	SA s^+ + SG									
	20/50	3	100	SA	colmatage brèche	oui							
P1-KL	-50/180	5	75-200	SA	colmatage brèche/fontis		-50/180	7.5 à 12	20-75	A	colmatage fontis?		1
	180/590	4 à 6	125-350	SA s^+ + SG			180/640	7.5 à 12	>200	SG			0
	590/880	7	100-160	SA	colmatage brèche/fontis		640/870	7.5 à 12	>200	SG	fluage vers karst possible		1
	880/1400	5 à 6	>200	SG			870/1400	7.5 à 12	>200	SG			0
P1-CD	-50/300	5	160-350	SA s^+ + SG			-50/300	7.5 à 10	>400	SG			0
	300/570	6	100-200	SA			300/350	7.5 à 10	200	SA s^+	fluage vers karst possible		1
	570/950	6	45-100	A + SA a^+			350/570	7.5 à 10	>400	SG			0
	950/1340	6	35-60	A			570/700	7.5 à 10	100-125	SA	fluage vers karst possible		1
							700/900	7.5 à 10	>400	SG			0
							900/1340	7.5 à 10	20-75	A			0

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (3)

Sondage pressiométrique SP. 8 LR Blois

0-1.6 m: Remblai

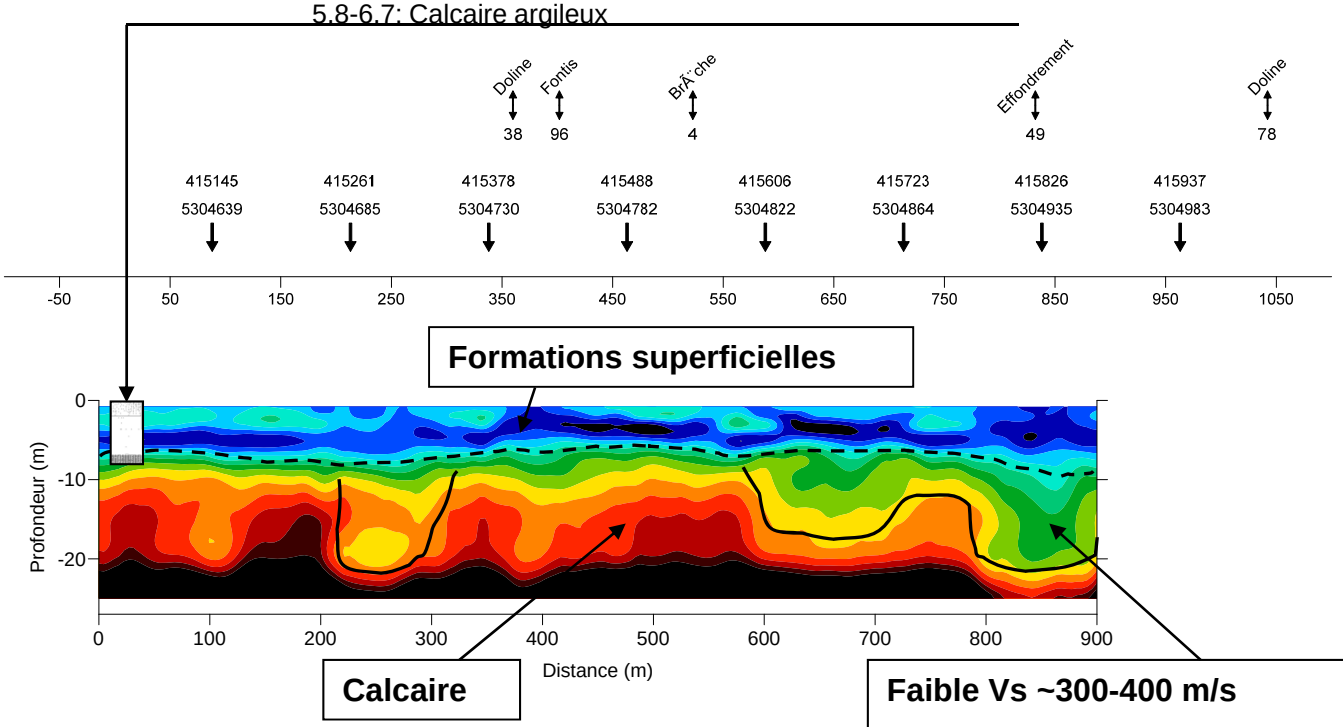
1.6-5.8 m: Sable fin graveleux

5.8-6.7: Calcaire argileux

> MASW:

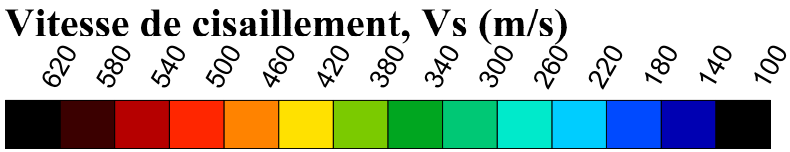
BD géol

Coordonnées WGS84-UTM 31 en fonction de la distance le long du profil (en m)



MASW

Coupe de vitesse de cisaillement



Faible Vs ~300-400 m/s

-> zones altérées, possibles karsts

Debeglia et al., 2006 *NSG*

Knödel, 1997, Vitesse et densité des milieux, *Geoexpert*

Interface Alluvions-calcaire entre 6 et 15 m pour tous les profils

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (4)

Forage destructif 3 BRGM ICSEO 2011

0-6.6 m: Remblai

6.6-13.7 m: Sable graveleux

13.7-20 m: Calcaire décomprimé

20-23 m: Passées très décomprimées ou cavité

23-40 m: Calcaire décomprimé

Forage destructif 2 BRGM ICSEO 2011

0-5 m: Remblai

5-13 m: Sable graveleux

13-40 m: Calcaire décomprimé

Forage destructif 1 BRGM ICSEO 2011

0-4.6 m: Remblai

4.6-12 m: Sable graveleux

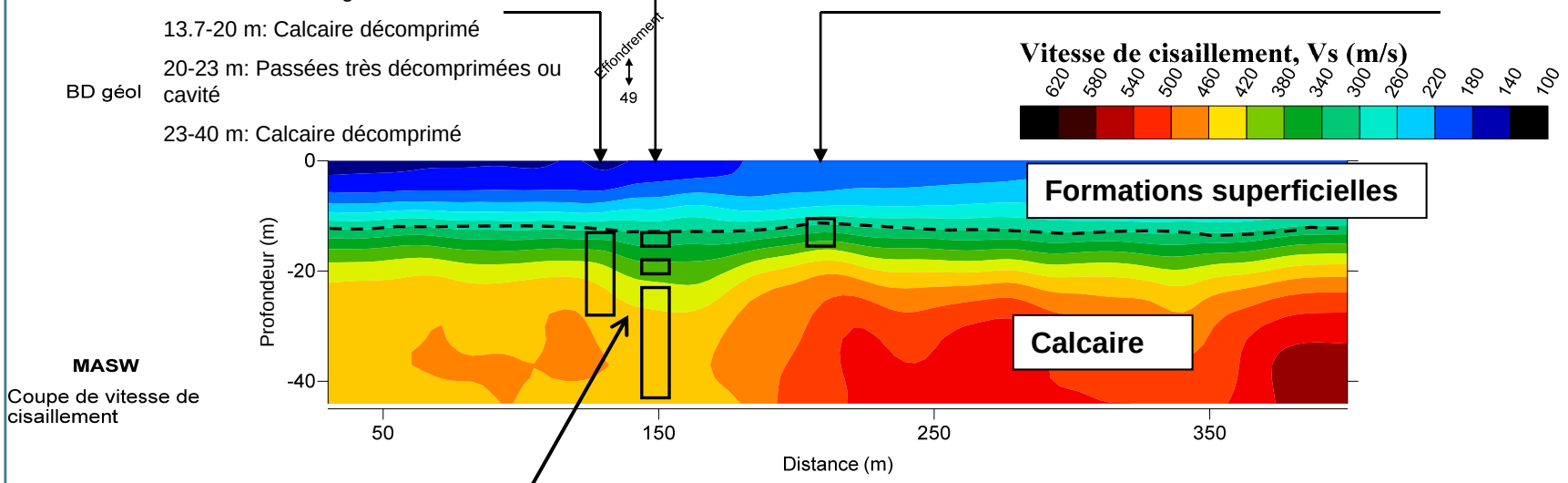
12-20 m: Calcaire décomprimé

20-40 m: Marno-calcaire compact

BD géol

Effondrement

49

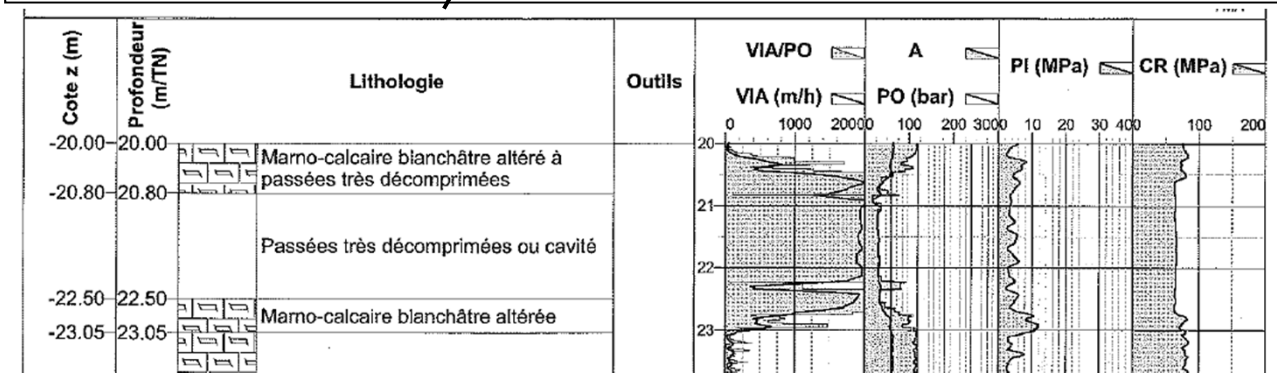


MASW

Coupe de vitesse de cisaillement

Zone de faible Vs ~300-400 m/s = zones altérée, possibles karsts ***(Debeglia et al., Knödel 1997 Vitesse et densité des milieux, Geoexpert)***

-> Zones à passées décomprimées et très décomprimées avec présence de cavité en profondeur



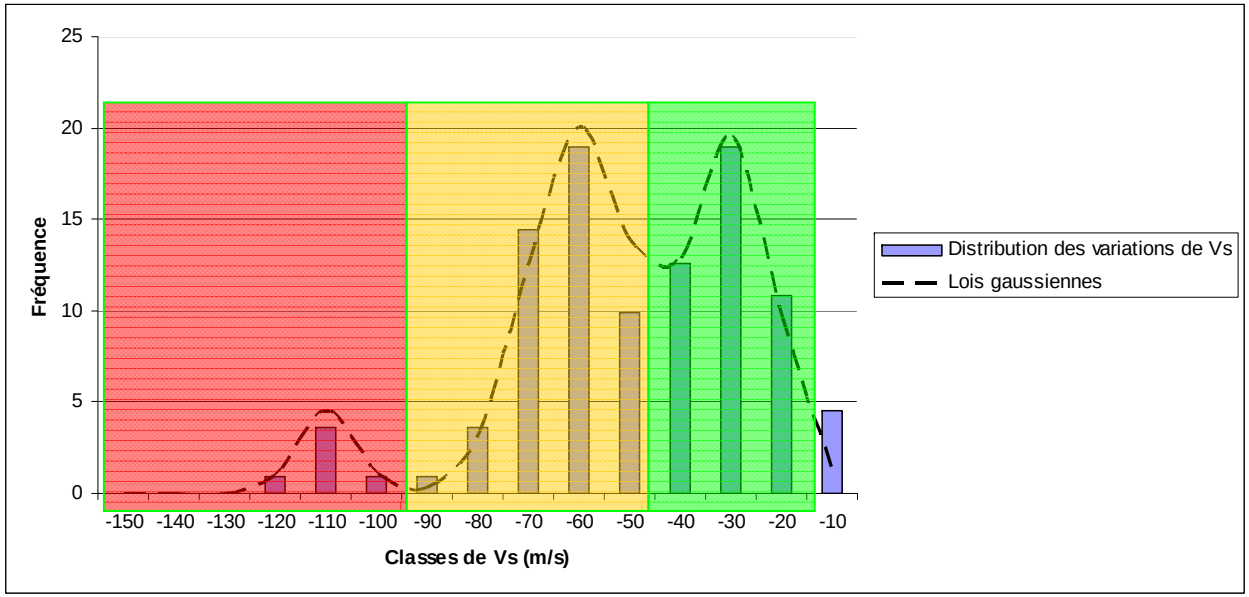
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Interprétation (5): Aléa en profondeur

> Méthodologie d'évaluation du niveau de susceptibilité de présence de karsts:

- Extraction des valeurs de Vs à une isoprofondeur > 20 m dans le calcaire calé ou supposé
- Calcul de la variation de vitesse par rapport à la Vs moyenne du profil à l'isoprofondeur. Ceci permet de s'affranchir des variations de Vs à grande échelle en rapport à des changements de lithologie
- Lissage de la courbe de vitesse obtenue avec un pas de 10 m (distance entre tir 10 m). Ceci permet de s'affranchir des variations induites par l'interpolation 2D.
- Extraction des variations de vitesse négatives (zones de vitesses plus faibles que la moyenne à l'isoprofondeur)
- Attribution d'un niveau de susceptibilité de présence 1,3 ou 5 selon les classes de variation de Vs estimées statistiquement par lois normales; Les variations <-10 m/s ne sont pas prises en compte



Niveau	Variation de VS
1	[-10 -45] m/s
3	[-45 -95] m/s
5	>-95 m/s

- Superposition de l'indice de susceptibilité karstique issu de l'interprétation Ohmmapper et implémentation du risque karstique associé (niveau +1 si cohérence avec risque sismique)

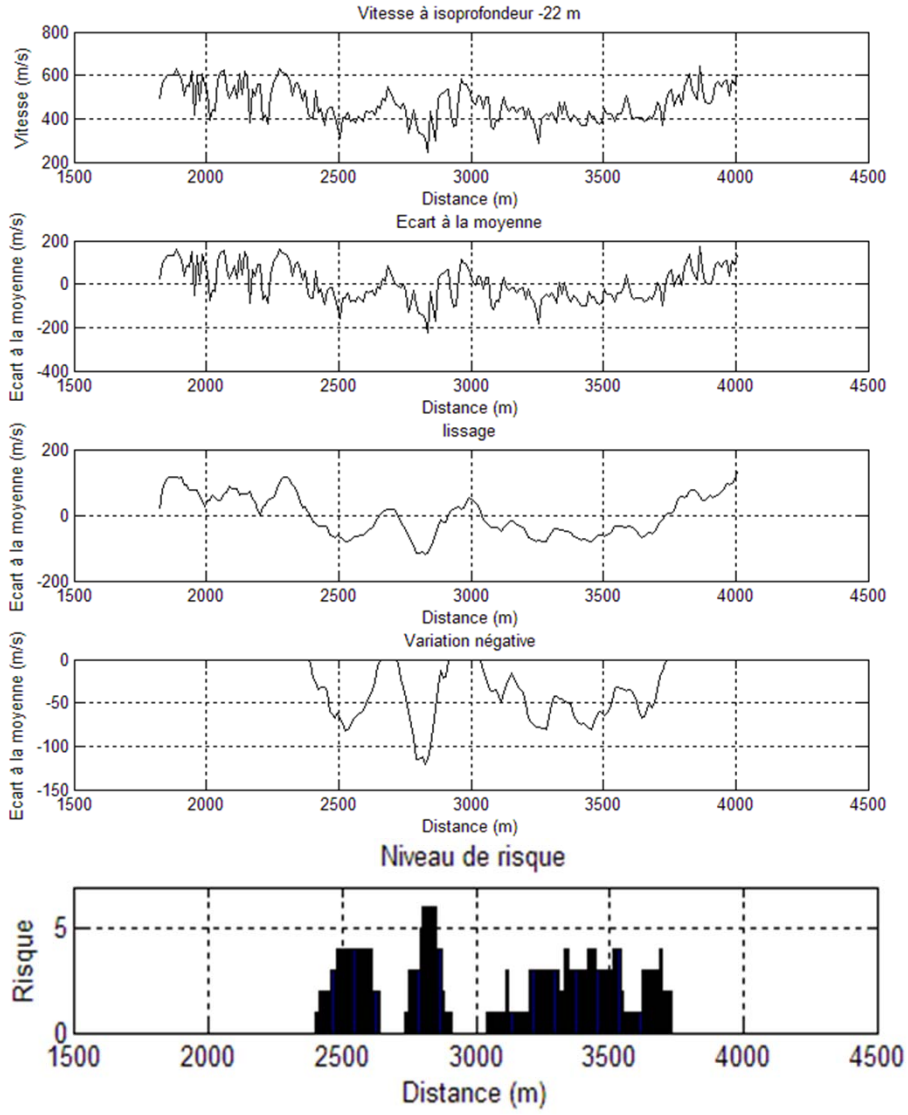
-> Echelle de susceptibilité de présence de karsts de 1 à 6

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (5)

P1-OP Jargeau -> Sandillon

> Exemples

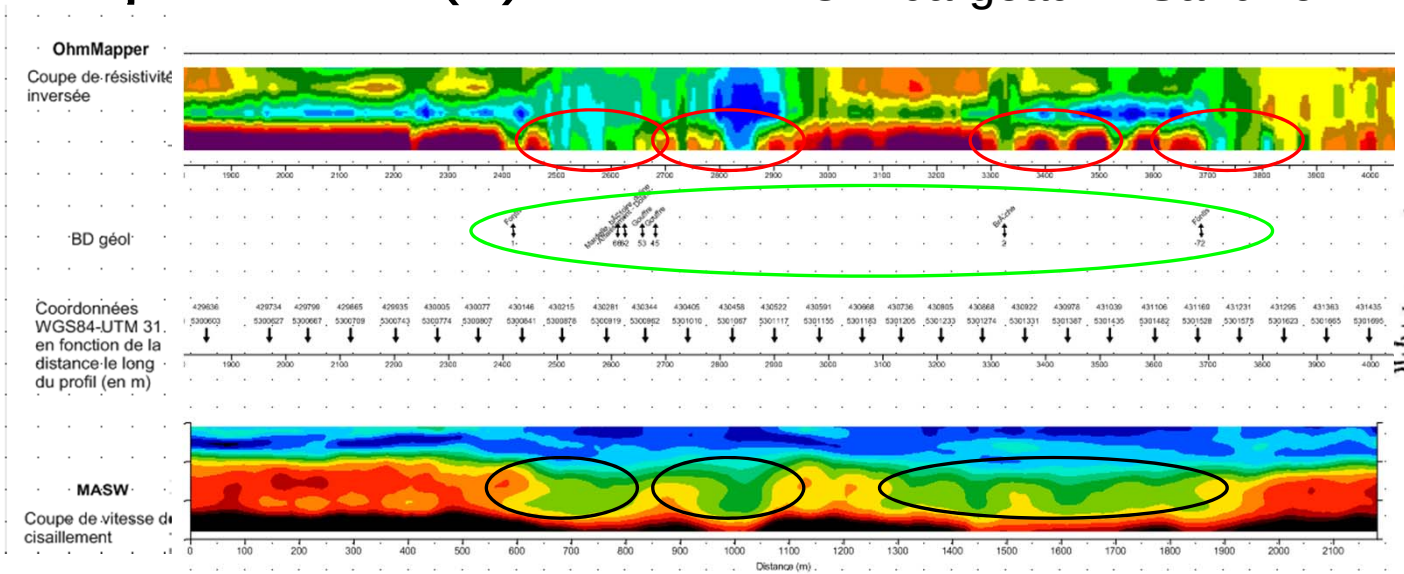


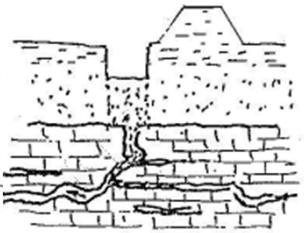
Géosciences pour une Terre durable

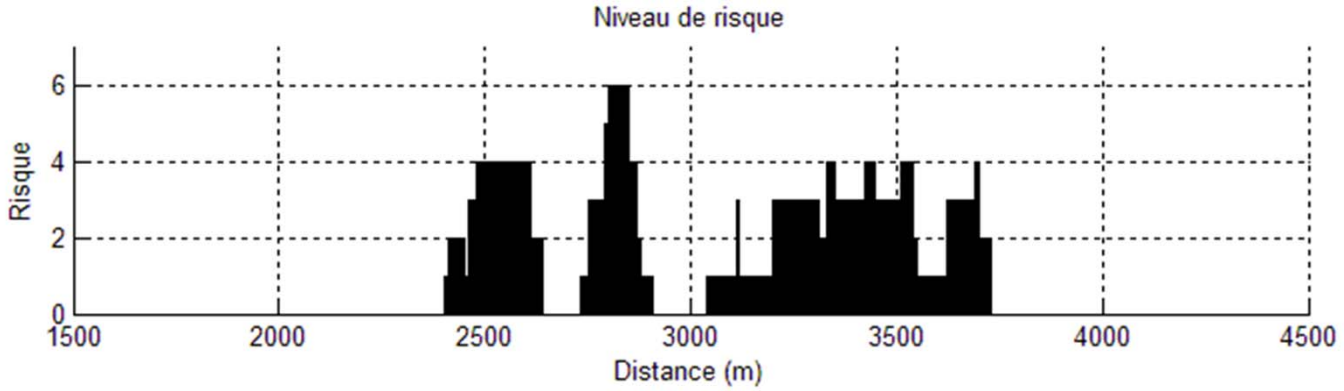
brgm

Interprétation (6)

P1-OP Jargeau -> Sandillon



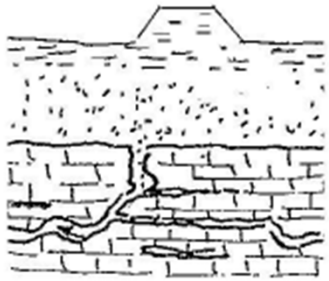


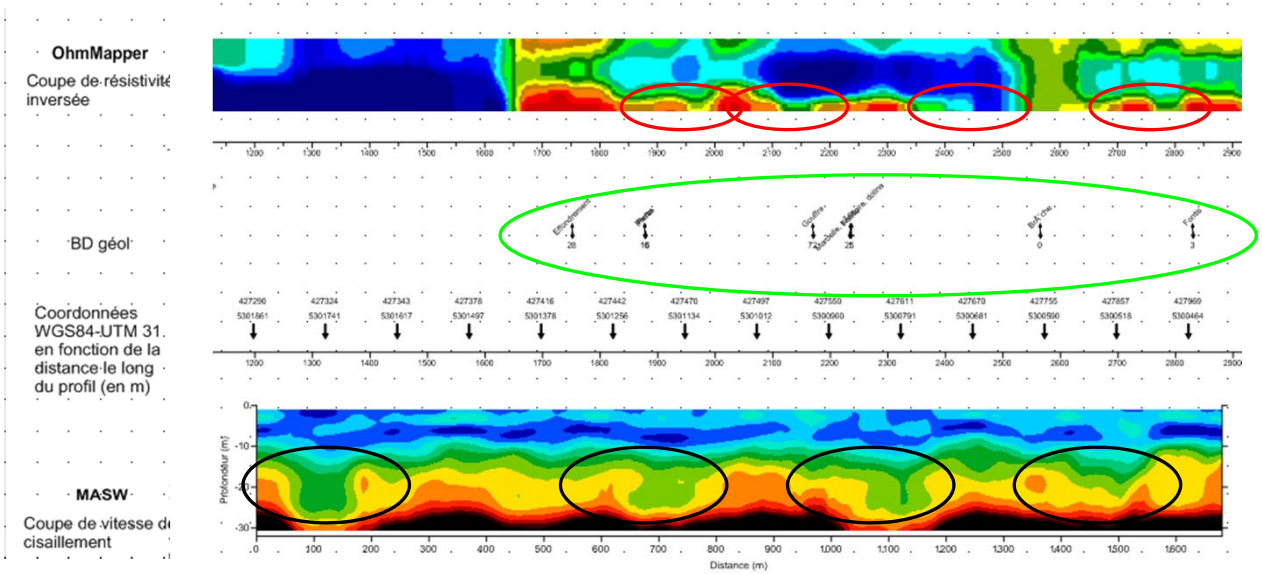


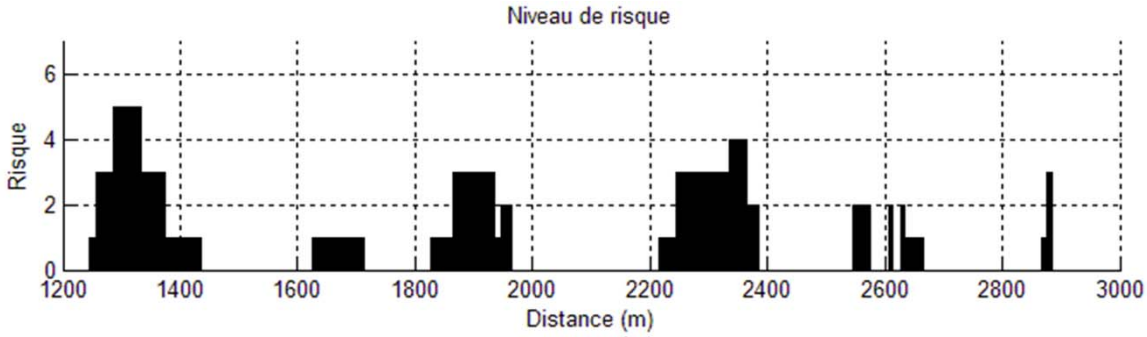
Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (7)

P1-GH Sandillon Ouest







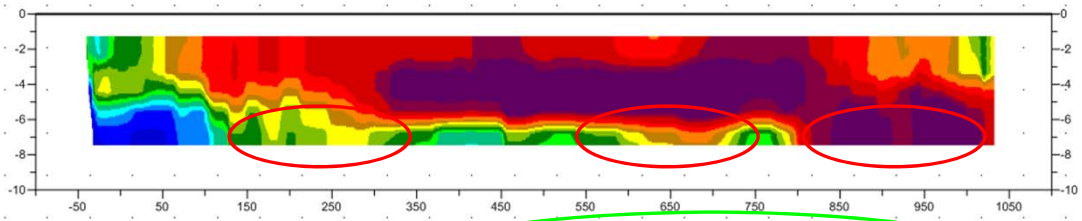
Géosciences pour une Terre durable
brgm

Interprétation (8)

P4-CD St-Pryvé St-Mesmin

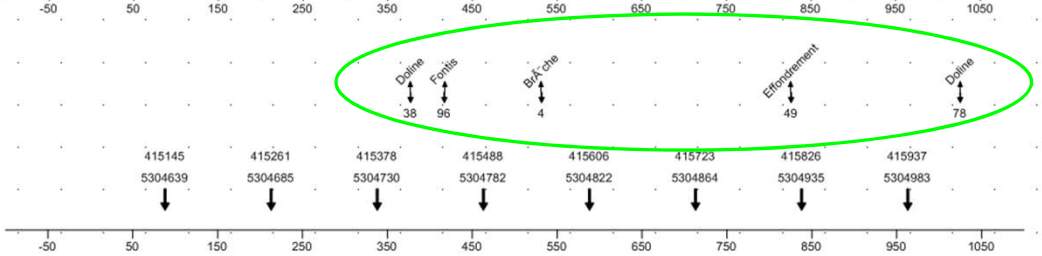
OhmMapper

Coupe de résistivité inversée



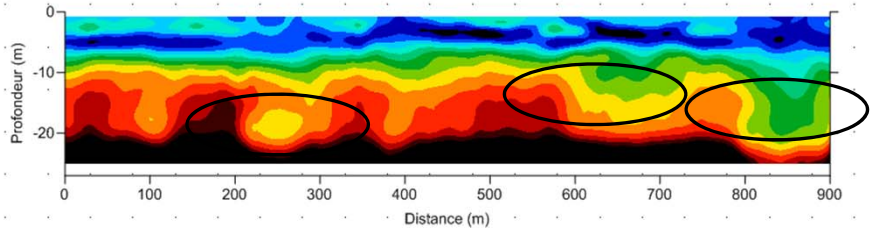
BD géol

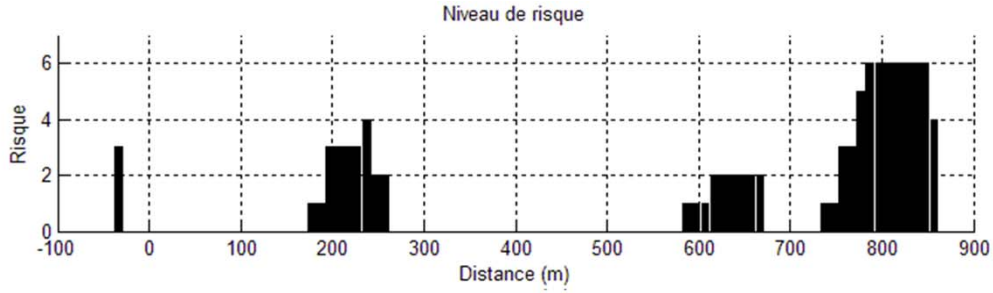
Coordonnées WGS84-UTM 31 en fonction de la distance le long du profil (en m)



MASW

Coupe de vitesse de cisaillement



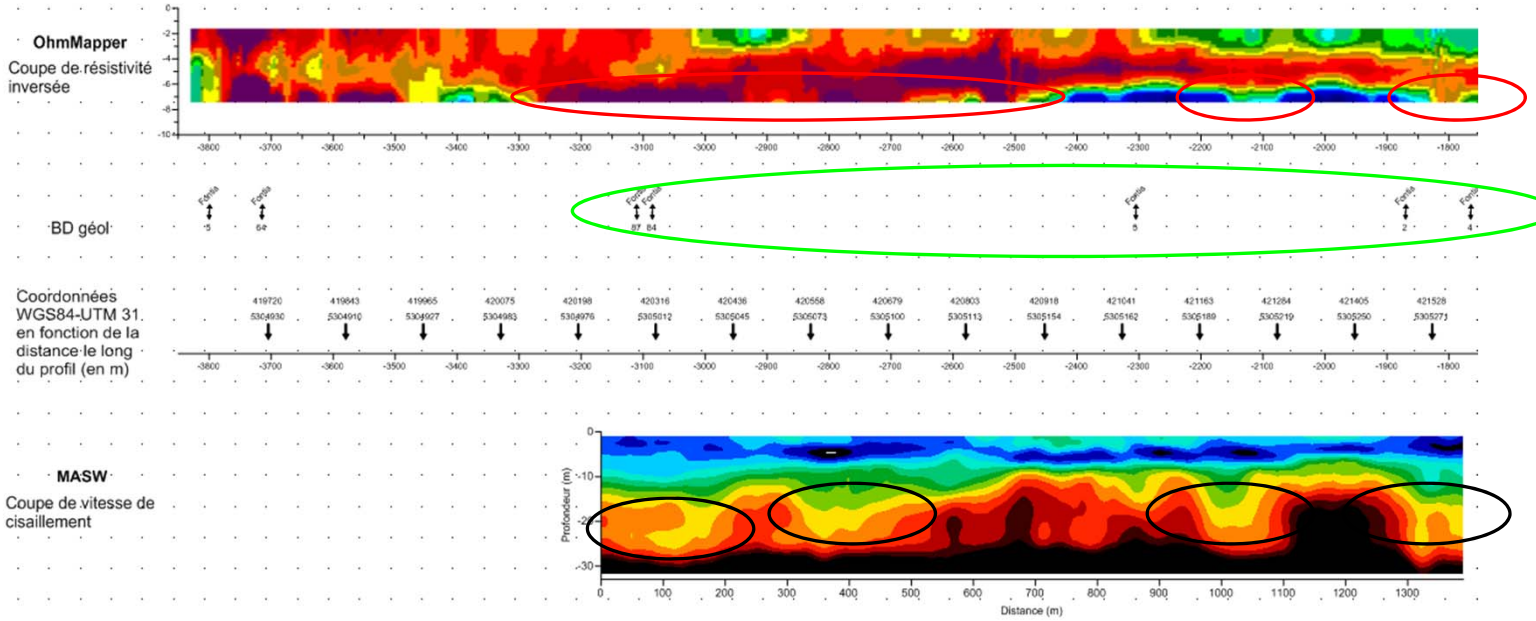


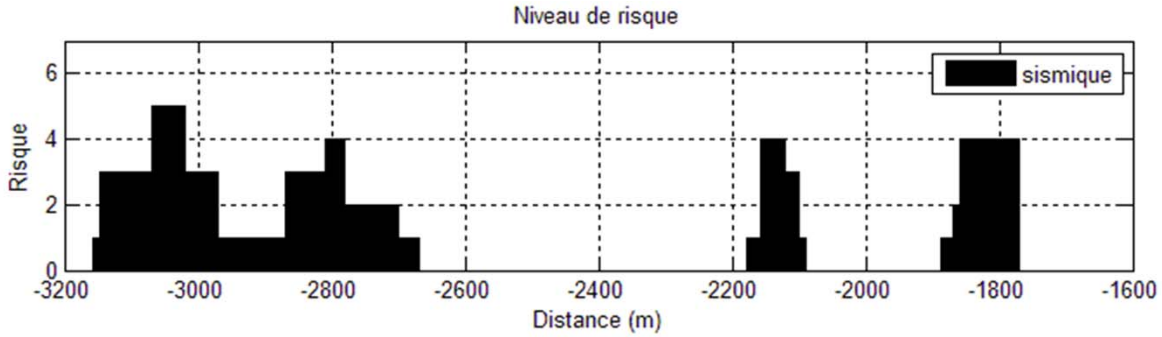
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Interprétation (9)

P1-IJ st-Denis-en-val Ile Charlemagne



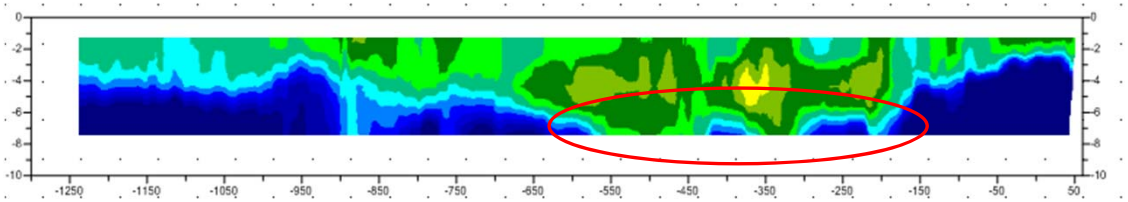


Interprétation (10)

P2-CD Jargeau Digue intérieure Est

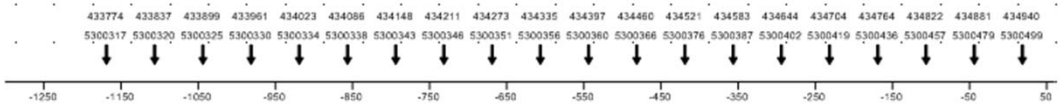
OhmMapper

Coupe de résistivité inversée



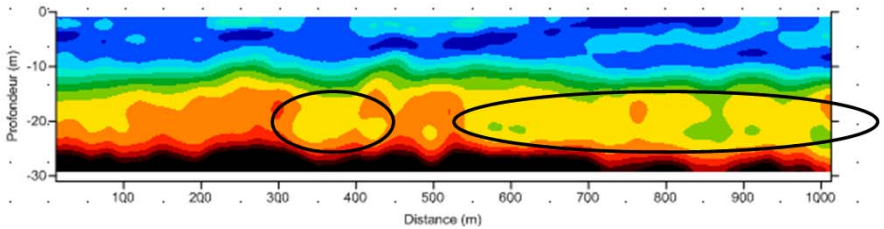
BD géol

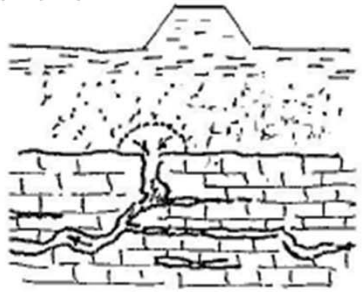
Coordonnées WGS84-UTM 31 en fonction de la distance le long du profil (en m)



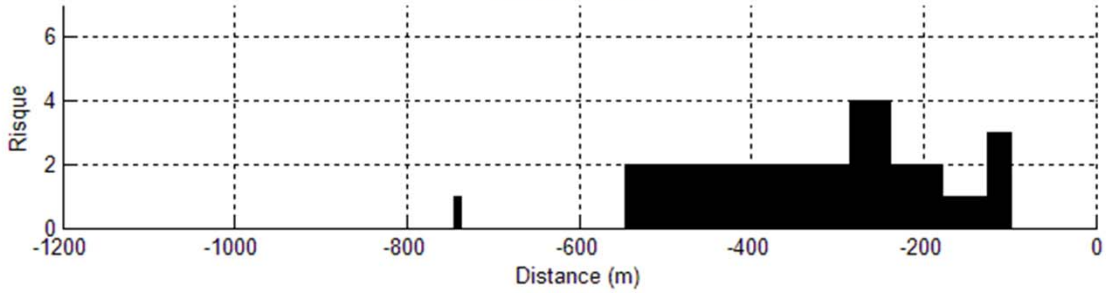
MASW

Coupe de vitesse de cisaillement





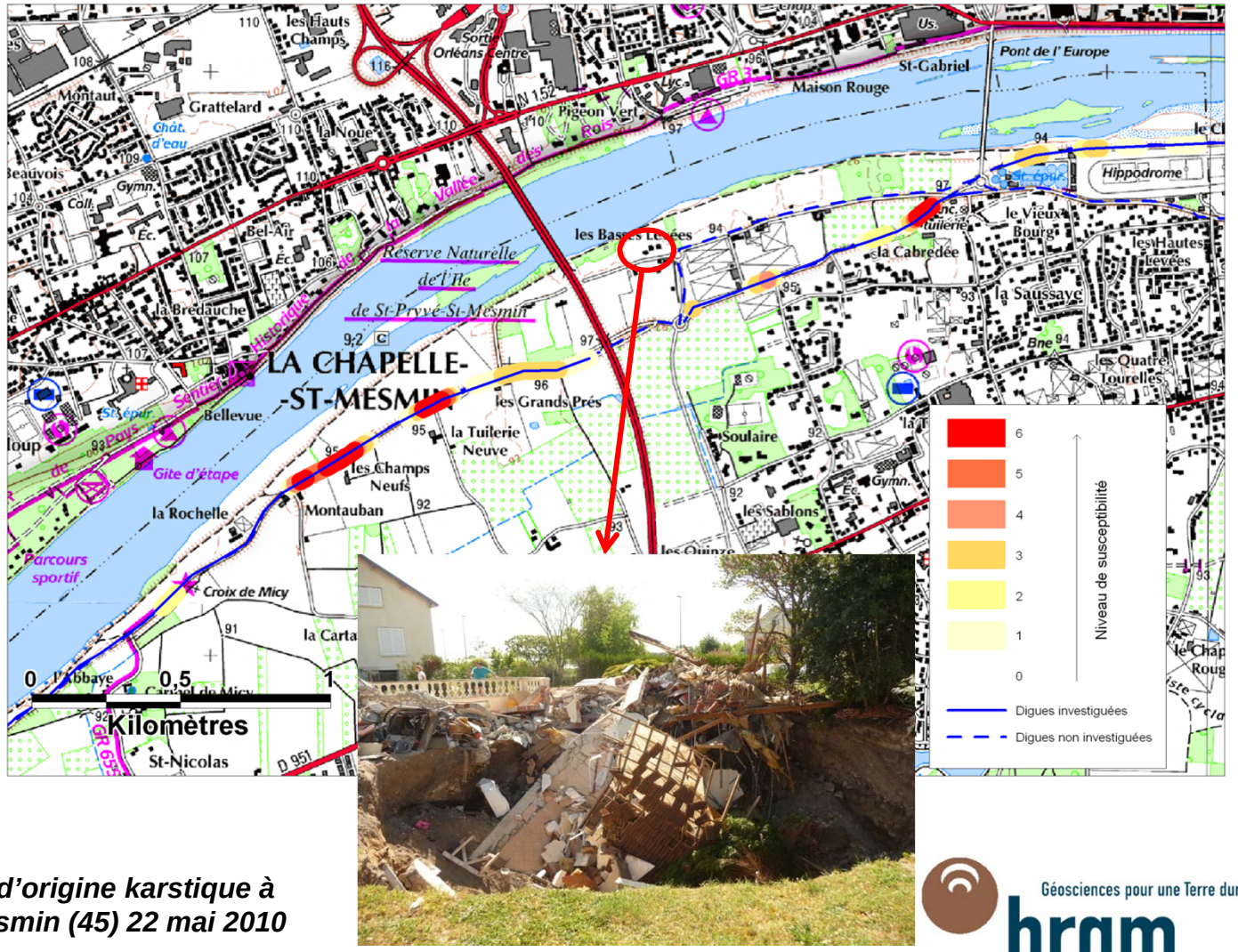
Niveau de risque



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Interprétation (11)



Effondrement d'origine karstique à St-Pryvé-St-Mesmin (45) 22 mai 2010

(Photo: BRGM)

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Conclusions

- La détermination du niveau de susceptibilité de présence d'évènements karstiques dans le calcaire profond (>20 m) est basée prioritairement sur la méthode sismique MASW
- Les anomalies superficielles données par la méthode Ohmmapper sont utilisées pour pondérer le niveau de susceptibilité de présence
- La complémentarité des méthodes sismique et électrique permet d'appréhender le risque effondrement et d'imager différents stades d'interaction entre le calcaire karstifié et le corps de digue.
- Le niveau de susceptibilité de présence d'évènements karstiques issu de la méthodologie montre une bonne cohérence avec la répartition des éléments de BD.
- On met cependant en évidence de nouvelles zones de fort niveau de susceptibilité de présence sans désordres apparents.

Géosciences pour une Terre durable
brgm



(Photo: BRGM)

Merci de votre attention



(Photo: BRGM)



(Photo: BRGM)

Géosciences pour une Terre durable
brgm