



# Détermination du niveau de susceptibilité de présence de karsts sous les digues de protection contre les crues du bassin de la Loire

*(Convention de recherche et développement partagé DREAL centre-BRGM)*

**K. Samyn, A. Nachbaur, F. Mathieu, A. Bitri, L. Closset, E. Gomez  
BRGM**



# Introduction (1)

## Raison d'être du projet

- L'effondrement d'une cavité karstique est susceptible de déstabiliser les digues de protection de la Loire, jusqu'à provoquer leur rupture et conduire ensuite à l'inondation du val. Pour prévenir ce risque à l'échelle du bassin de la Loire, la DREAL Centre, gestionnaire de ces ouvrages, a initié en 2006 un projet de recherche et de développement cofinancé par le BRGM.

## Introduction (2)

### Objectifs du projet

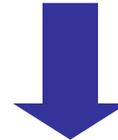
- **Elaborer une méthodologie permettant de déterminer une susceptibilité de présence de karsts sous les digues de la Loire à différentes échelles**
- **Caractériser l'hétérogénéité des digues de la Loire**
- **Orienter les futures actions complémentaires envisageables sur les digues de la Loire**

# Introduction (3)

## Chronologie du projet KARST LOIRE

TRANCHE 1

**Collecte exhaustive des données géologiques et hydrogéologiques disponibles le long des levées**



**« Élaboration d'une carte de probabilité de présence de karsts à l'échelle du bassin (le long des levées domaniales de la Loire) »**



TRANCHE 2 et 3

**Etude spécifique sur les secteurs les plus problématiques concernant la stabilité des levées**

# **Tranche 1: Élaboration d'une carte de susceptibilité de présence de karsts à l'échelle du bassin (le long des levées domaniales de la Loire)**

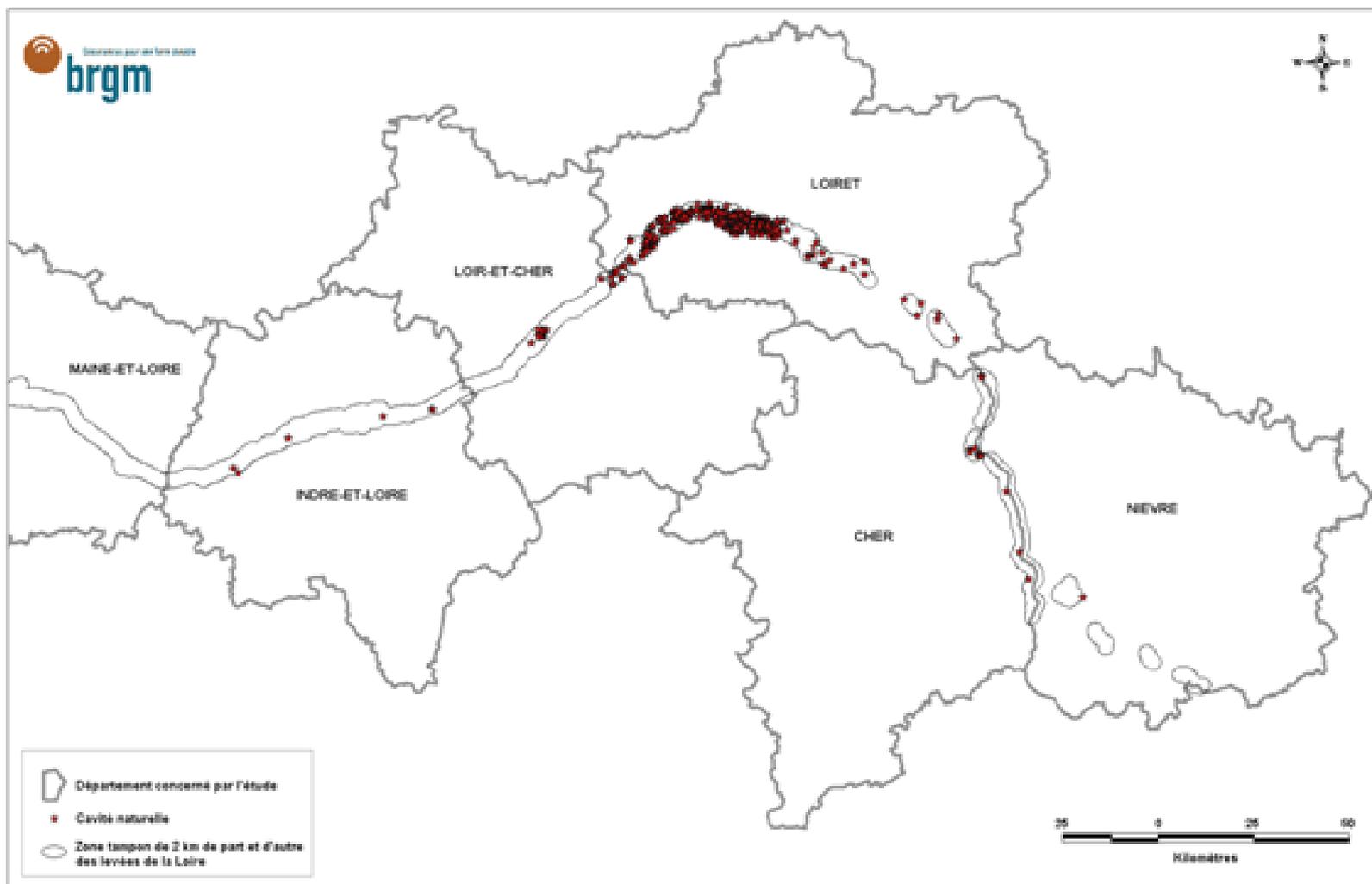
## La méthode envisagée s'appuie ...

- **d'une part sur les inventaires de données localisées (inventaire de karsts et d'évènements liés au karsts)**
- **d'autre part sur une liste de critères explicatifs pertinents identifiés avec les géologues et hydrogéologues locaux**
  - **A partir de cela, la méthode « superpose » ces deux types d'information** (de manière à gérer la non exhaustivité des données de l'inventaire, les effets de seuil induit par les jugements d'expert, la représentation de l'incertitude...)
  - **Elle traite différemment les critères quantitatifs de ceux qualitatifs.**

# **Méthode d'évaluation de la susceptibilité de présence de karsts sur le linéaire de levées**

- 1. D'un coté, un inventaire de karsts et d'évènements liés aux karsts (avérés ou supposés) (plus de 760 données récoltées)**
- 2. De l'autre, des critères théoriques de susceptibilité de présence**
- 3. Le tout permettant d'attribuer une note à tous les éléments d'une grille de calcul**

# Inventaire d'évènements liés aux karsts

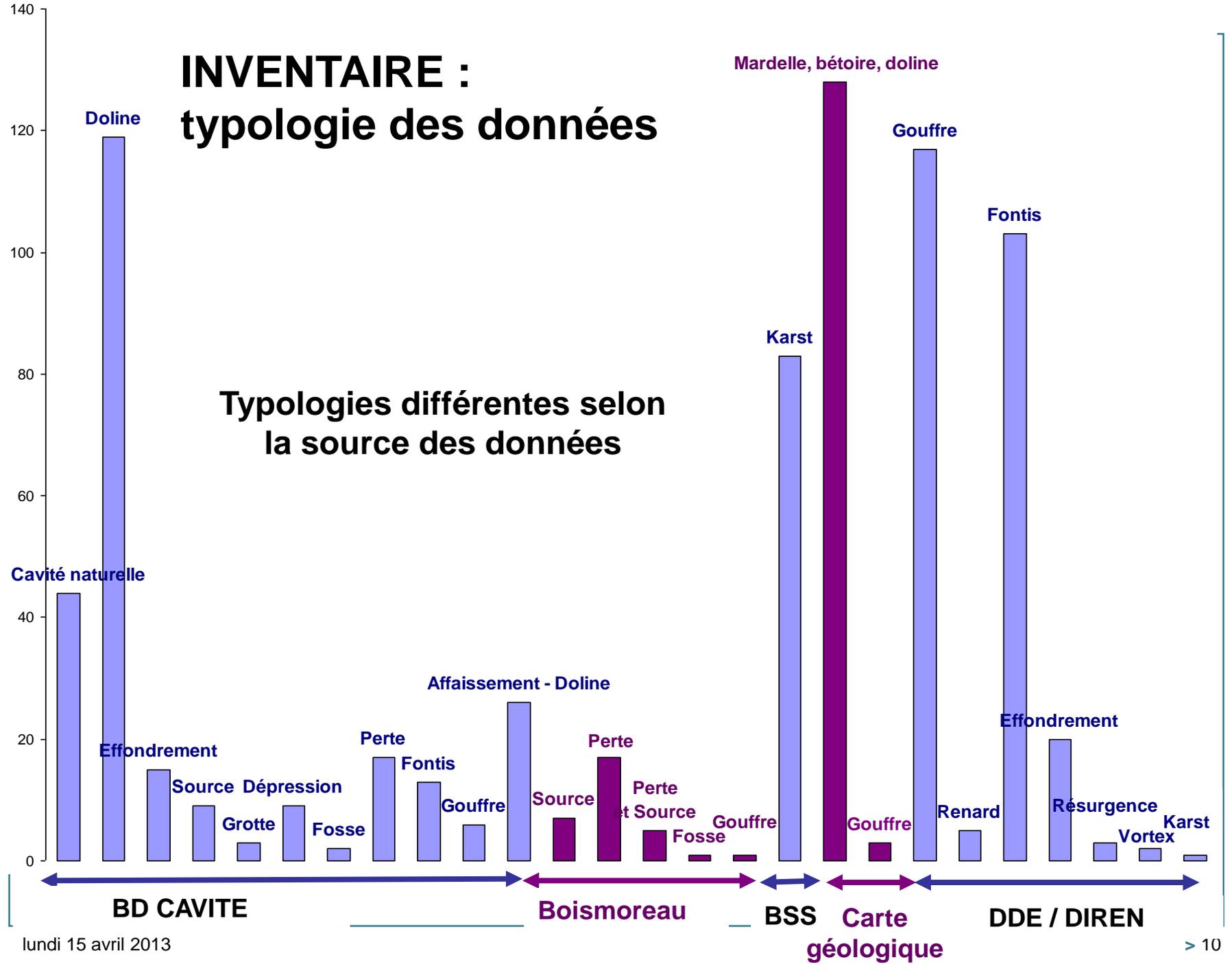


# Problématiques liées aux données d'entrée

- > **Non exhaustivité de l'inventaire des cavités karstiques (caractère souterrain)**
  - > **Hétérogénéité de répartition des données le long du linéaire (selon les départements, selon les secteurs urbanisés ou inhabités..)**
    - Elimination du traitement statistique
  - > **Diversité des sources de données (spéléologue, BD Cavités, cartes géologiques...)**
  - > **Absence de détails (profondeur, dimension, ..)**
    - Elimination de l'expertise détaillée
- Il faut donc se contenter d'un inventaire dont la qualité varie le long du linéaire des levées selon la connaissance disponible, la disponibilité d'archives et l'importance donnée au phénomène dans le département concerné.**

# INVENTAIRE : typologie des données

Typologies différentes selon  
la source des données



# Caractéristiques des critères explicatifs recherchés

**Théoriquement, ils doivent essayer d'expliquer les deux phénomènes suivants :**

- **la présence de karst en profondeur**  
et / ou
- **l'apparition de désordres en surface liés à ces karsts**

**Pratiquement, les critères choisis doivent être :**

- **complémentaires**
- **discriminants sur le secteur d'études**
- **représentables à partir de donnée facilement disponibles**

# Critères retenus

- **critères explicatifs à « la présence de karst en profondeur » :**
  - **Nature géologique :** *les karsts 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*
- **critères explicatifs à « l'apparition de désordres en surface liés à ces karsts » :**
  - **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.*

# Gestion de ces critères grâce à deux outils

Critères explicatifs théoriques

→ « *nature du substratum* »

→ « *épaisseur des alluvions* »

Donnée de l'inventaire

+

Critère QUALITATIF  
ex : « *nature du substratum* »

Fonction de densité

Problématique résolue :  
Hétérogénéité de répartition de l'information

Critère QUANTITATIF  
ex : « *épaisseur des alluvions* »

+

Donnée de l'inventaire

Fonction de possibilité

Problématique résolue :  
Manque de données



Géosciences pour une Terre durable

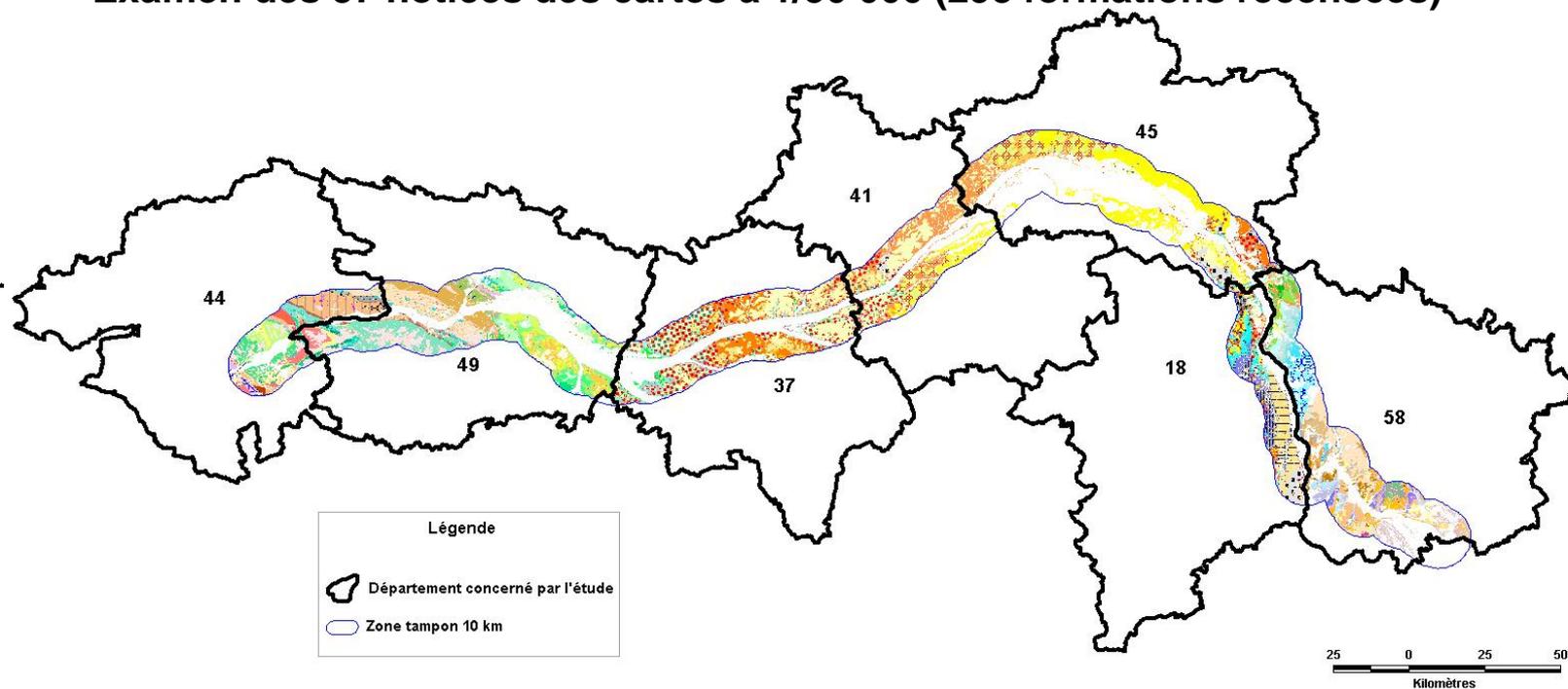
**brgm**

# Critère « Nature géologique du substratum »



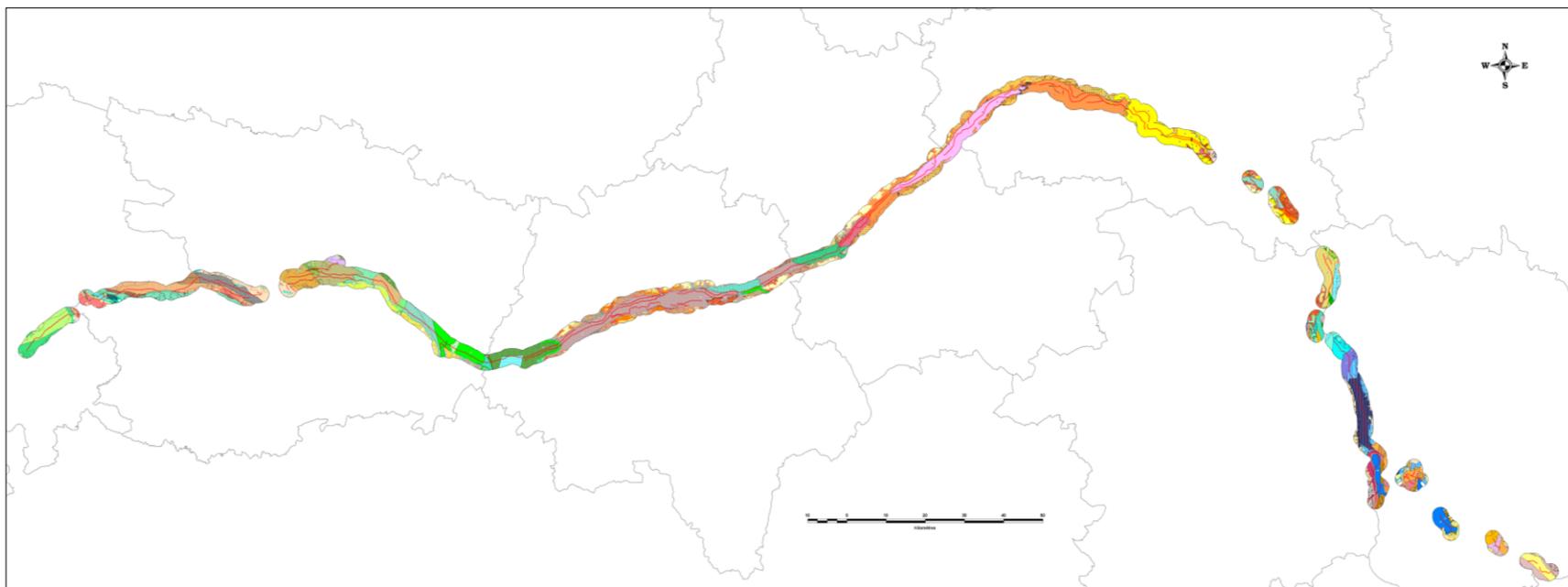
A partir des cartes géologiques harmonisées :

- Sélection des formations (sauf alluvions) sur une zone tampon de 10 km
- Examen des 37 notices des cartes à 1/50 000 (293 formations recensées)



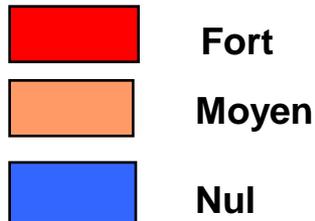
# Critère « Nature géologique du substratum »

- Création de l'écorché géologique sur une zone tampon de 2 km
- Utilisation de plus de 3000 sondages
- 162 formations au final

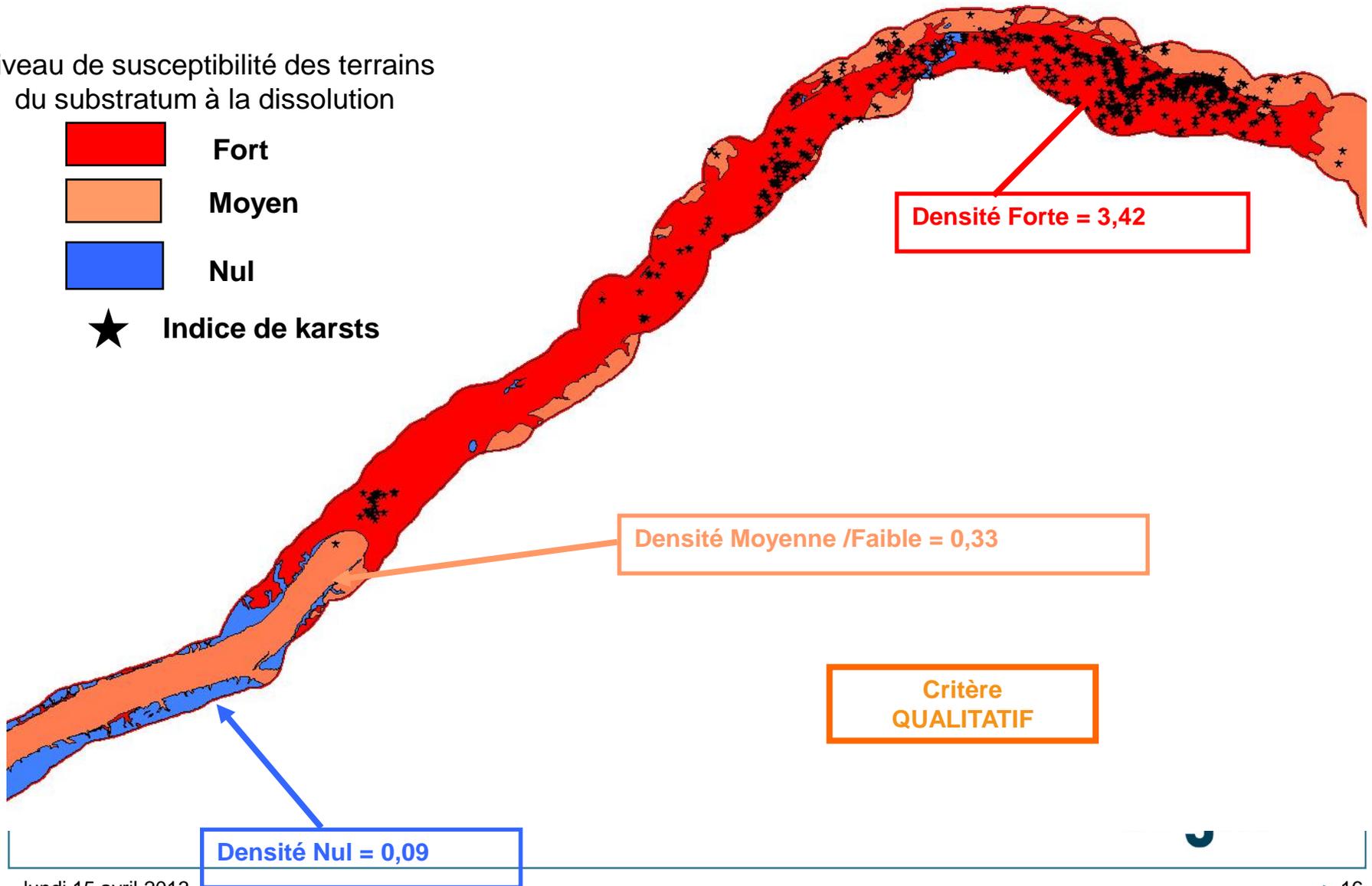


# Niveau de susceptibilité suivant le critère « nature du substratum » (critère qualitatif)

Niveau de susceptibilité des terrains  
du substratum à la dissolution

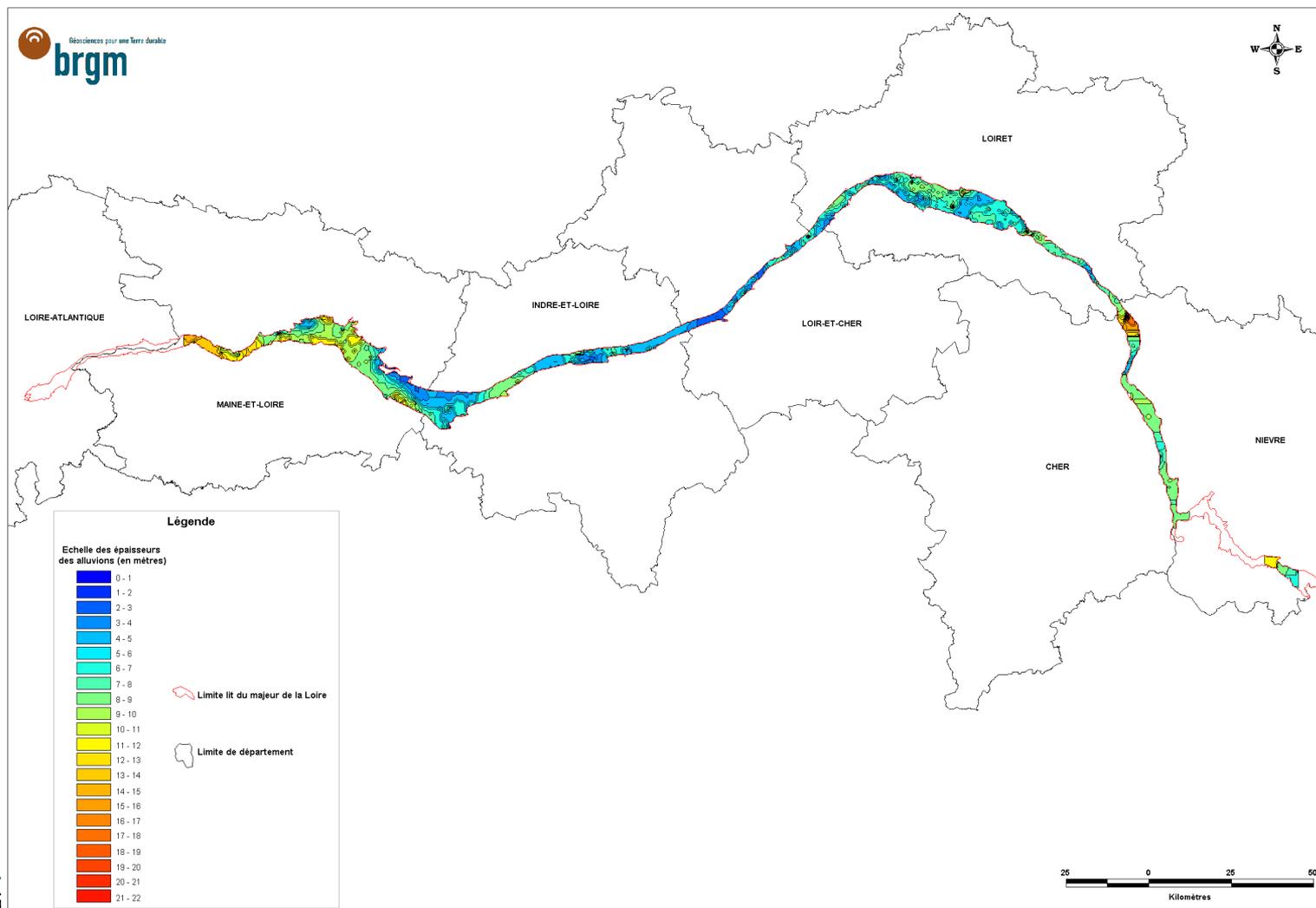


★ Indice de karsts

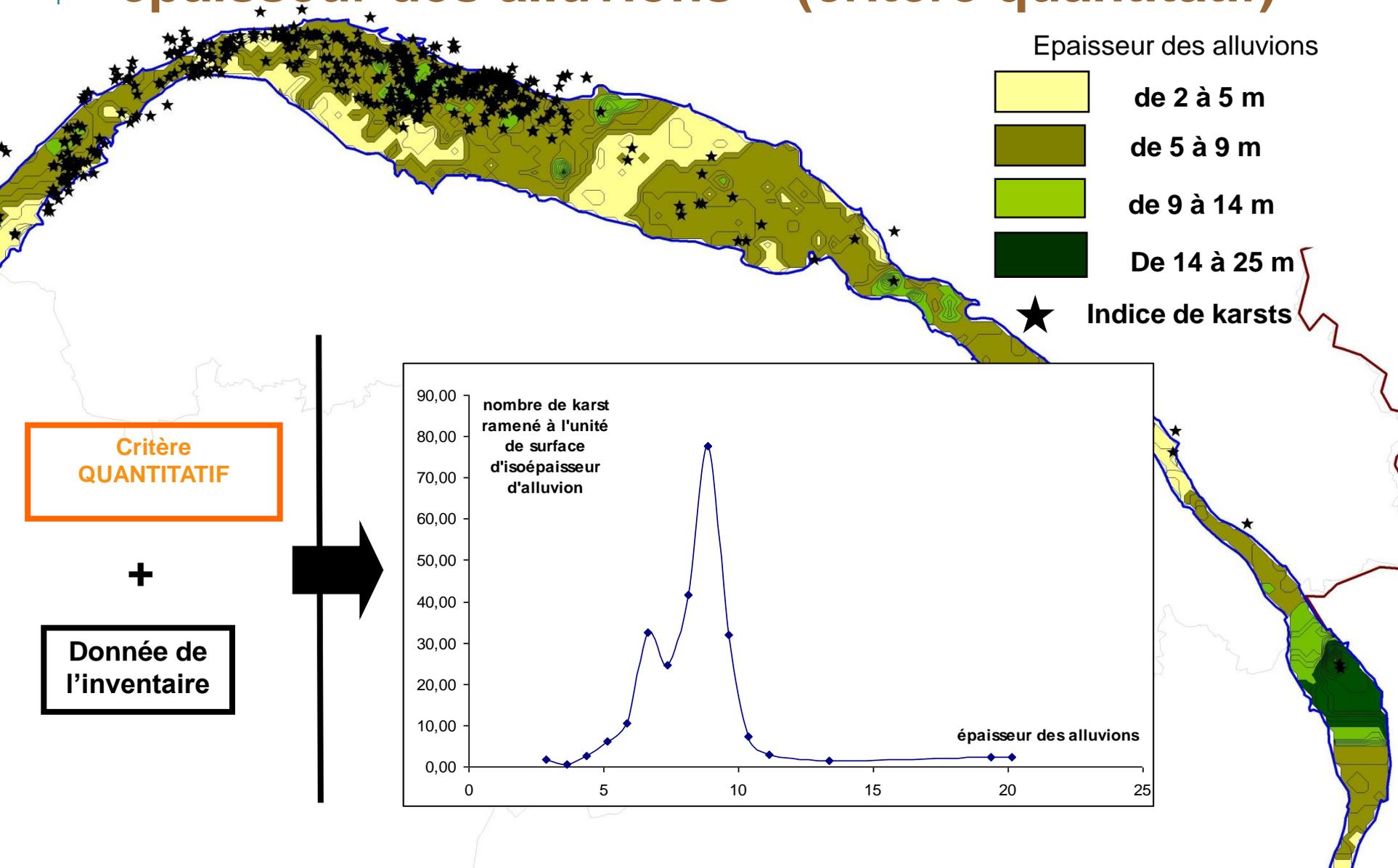


# Critère « Epaisseur des alluvions » »

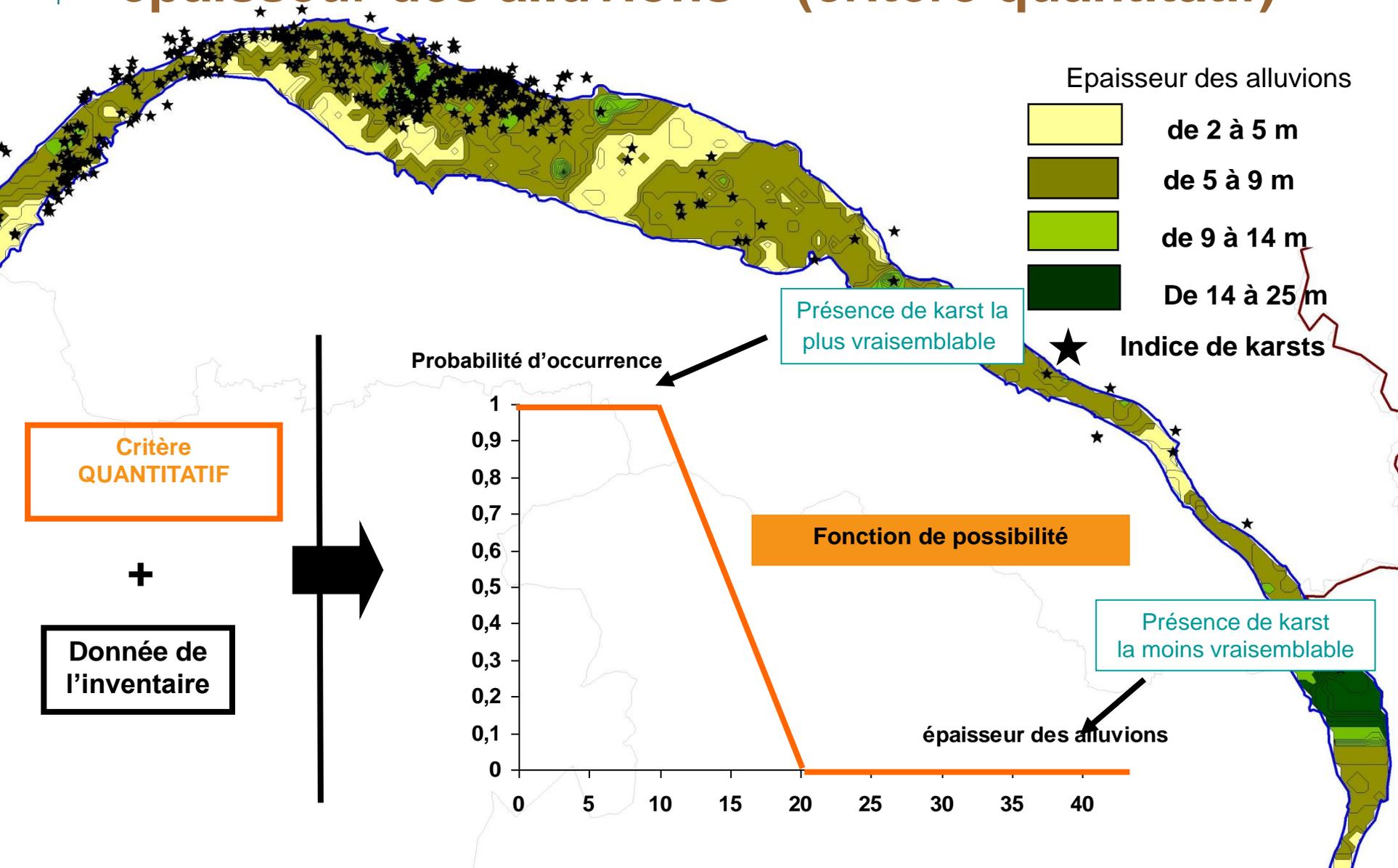
- Sélection de 2807 sondages ayant traversé les alluvions du lit majeur de la Loire
- Interpolation par krigeage de la profondeur du mur des alluvions
- mini > 0 m ; maxi < 22 m



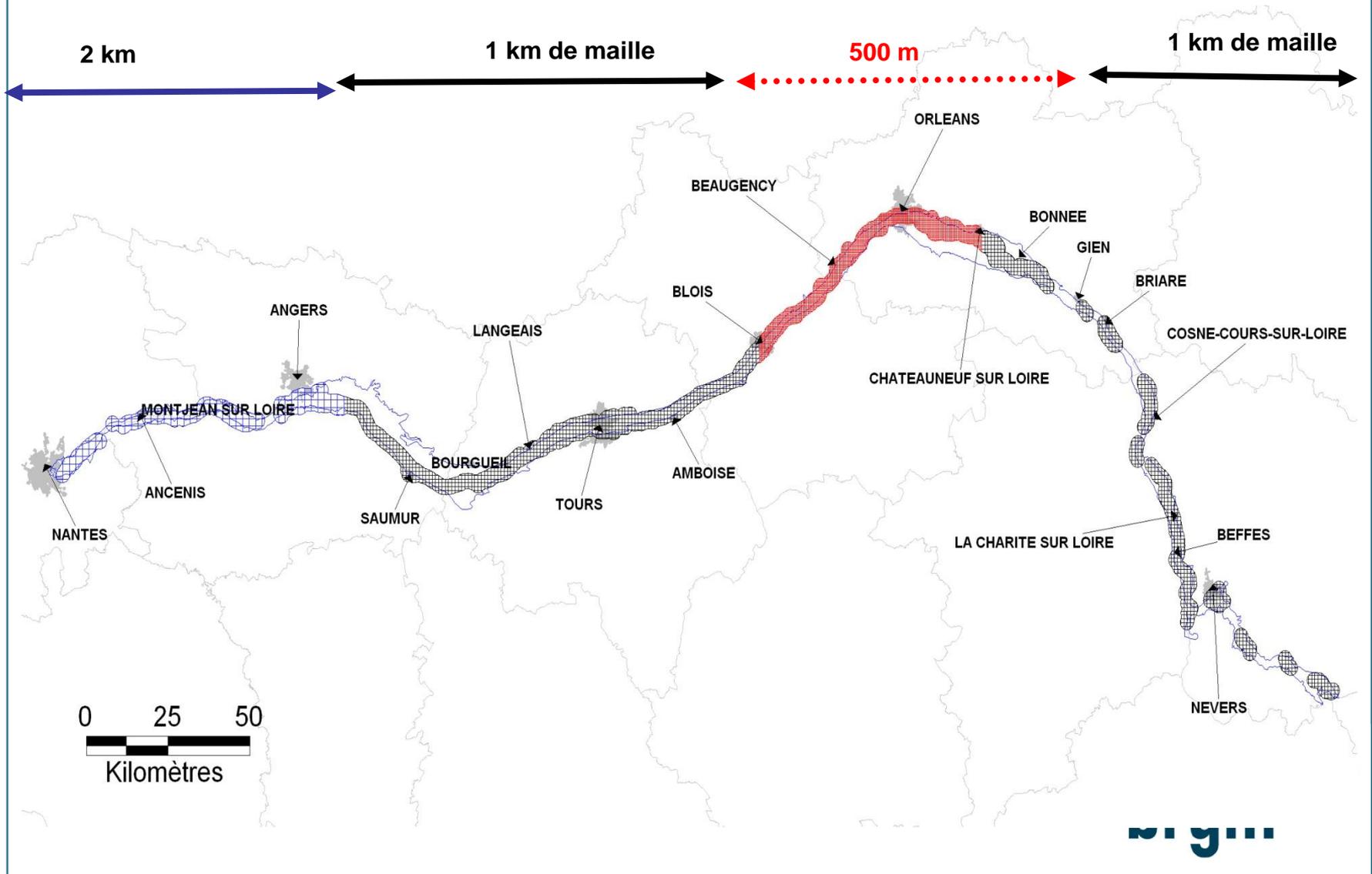
# Niveau de susceptibilité suivant le critère « épaisseur des alluvions » (critère quantitatif)



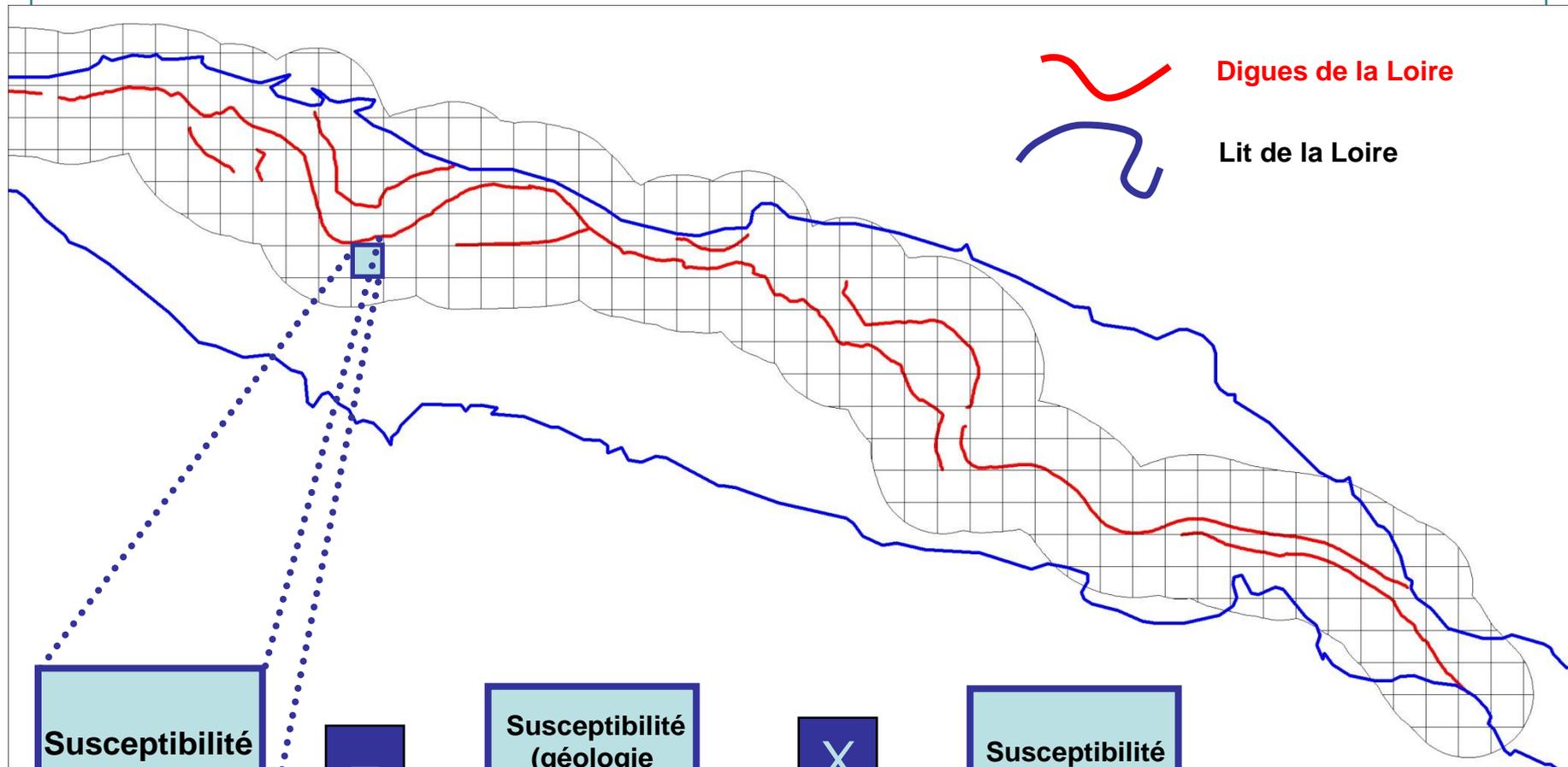
# Niveau de susceptibilité suivant le critère « épaisseur des alluvions » (critère quantitatif)



# Taille de la maille de calcul fixée selon les résultats attendus en sortie



# Note de susceptibilité calculée par maille



Susceptibilité

=

Susceptibilité  
(géologie  
∩  
perméabilité)

X

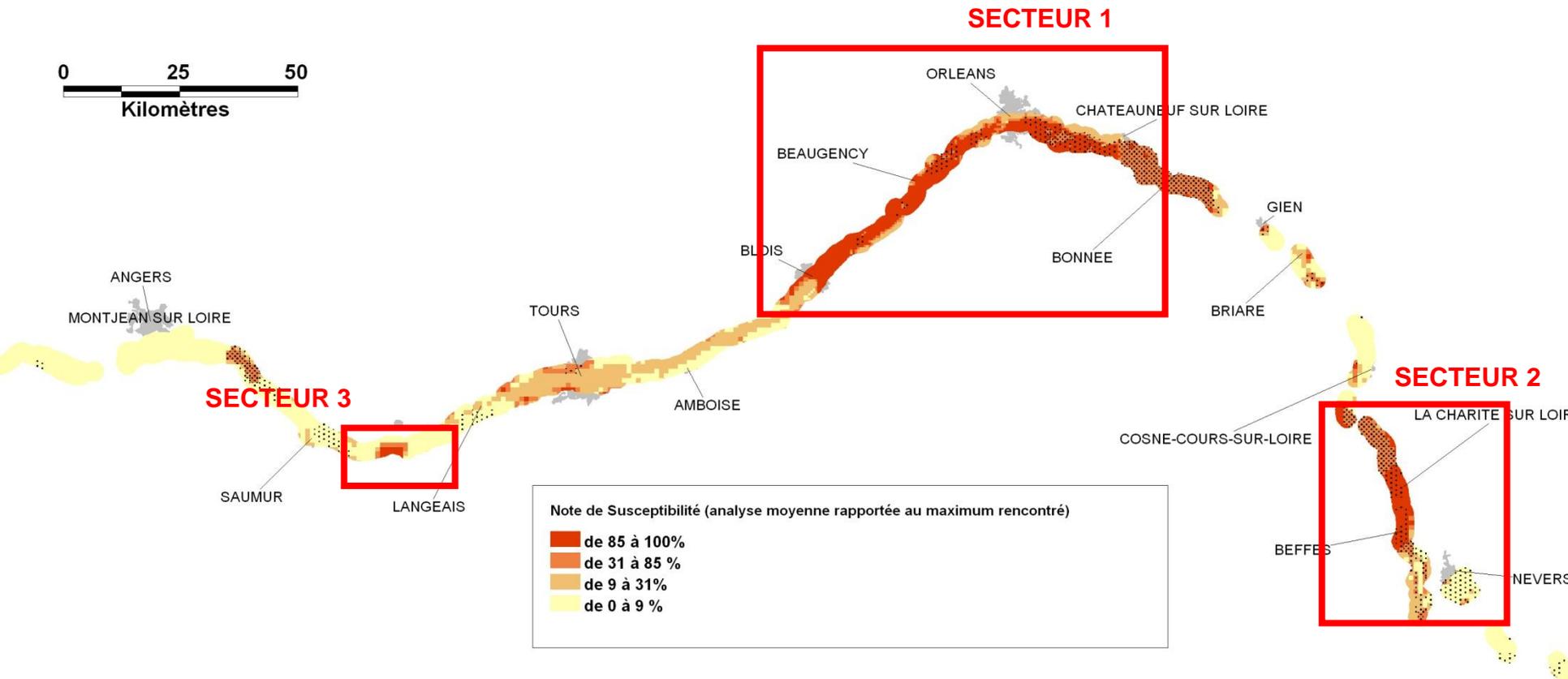
Susceptibilité  
(épaisseur)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Susceptibilité de présence d'événements karstiques



# Susceptibilité de présence d'événements karstiques

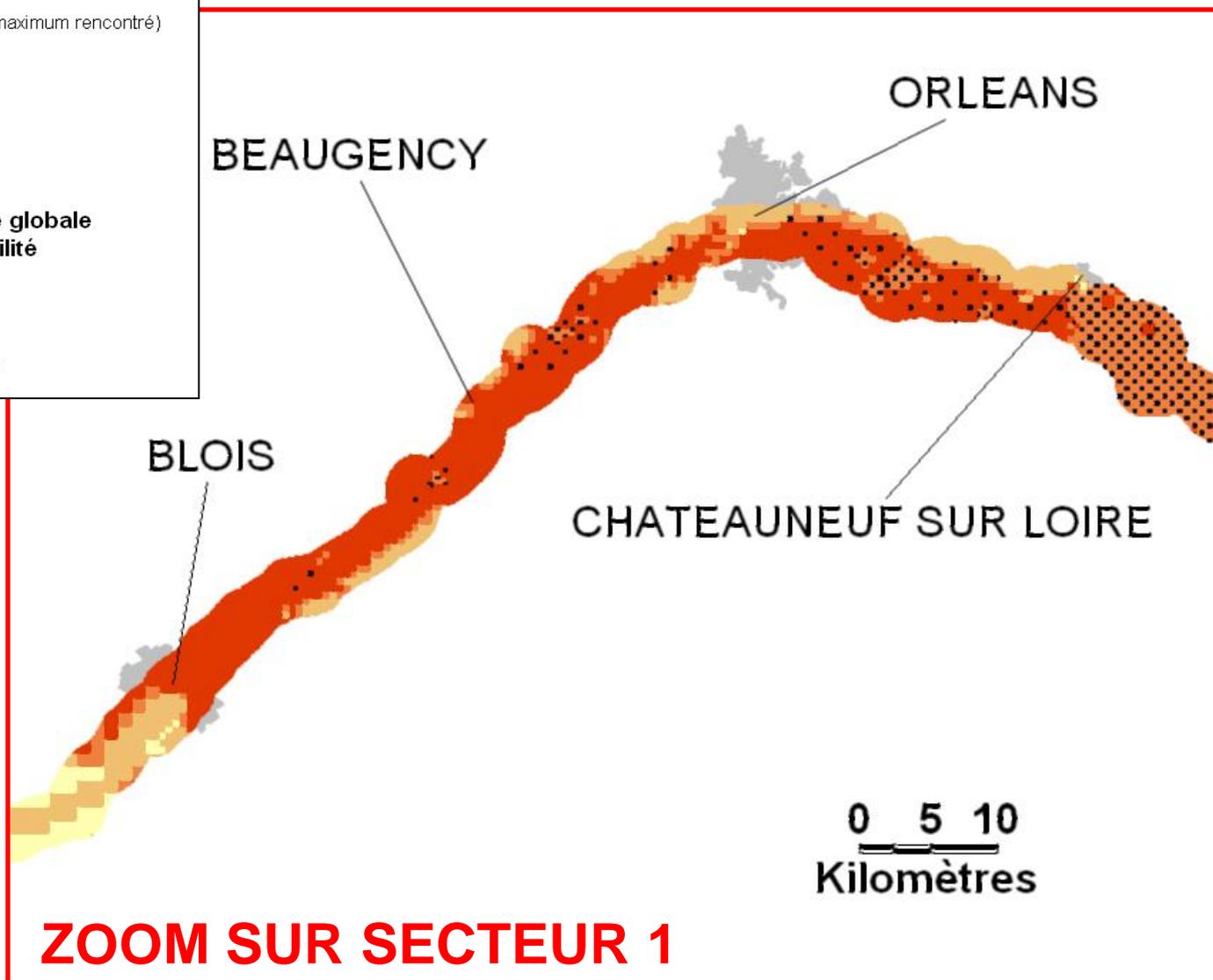
## Note de Susceptibilité

(analyse moyenne rapportée au maximum rencontré)

- de 85 à 100%
- de 31 à 85 %
- de 9 à 31%
- de 0 à 9 %

## Influence de l'incertitude globale sur la note de susceptibilité

- de 20 à 50% d'écart
- de 4 à 20% d'écart
- moins de 4 % d'écart



# Susceptibilité de présence d'événements karstiques

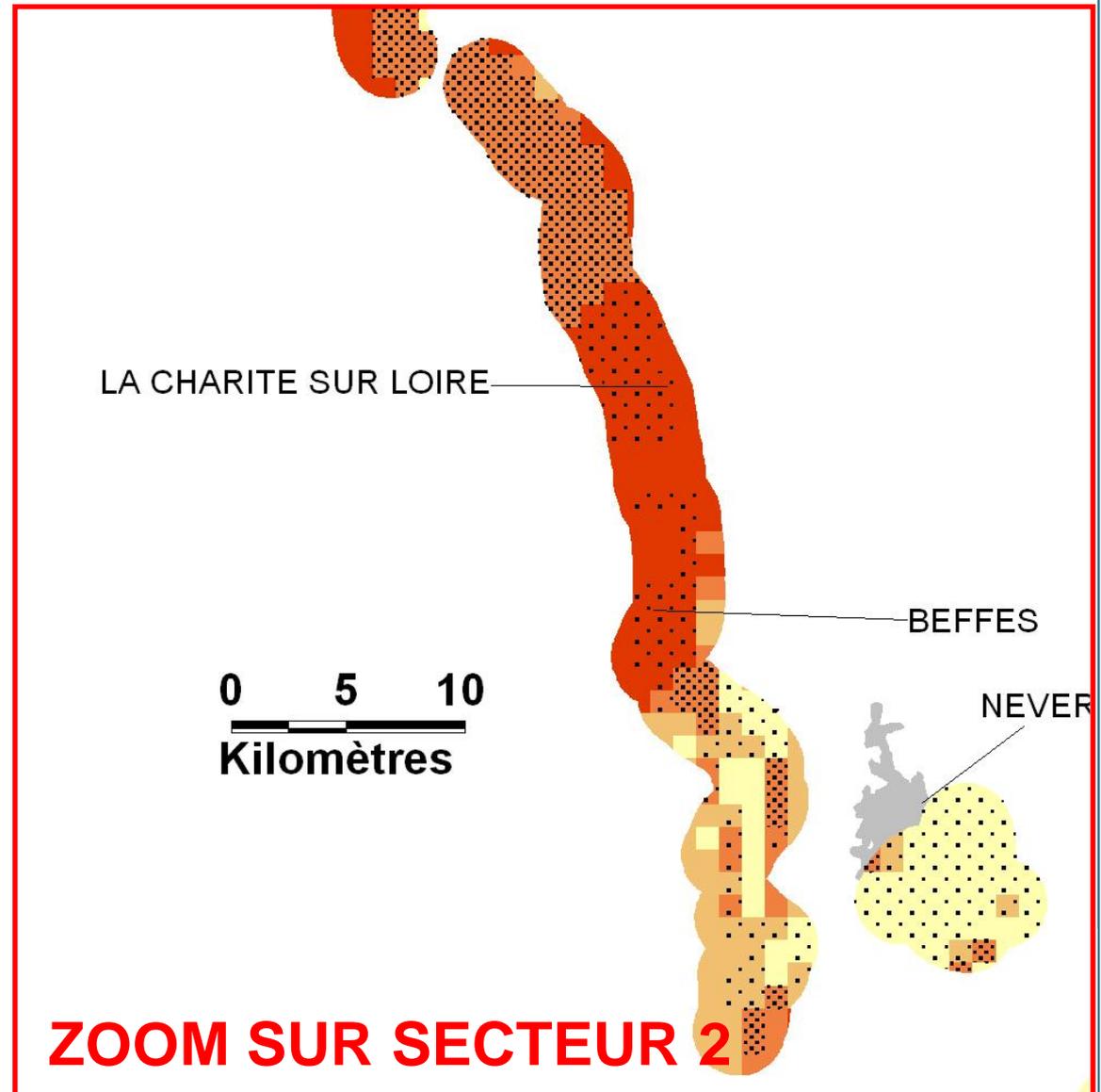
## Note de Susceptibilité

(analyse moyenne rapportée au maximum rencontré)

- de 85 à 100%
- de 31 à 85 %
- de 9 à 31%
- de 0 à 9 %

## Influence de l'incertitude globale sur la note de susceptibilité

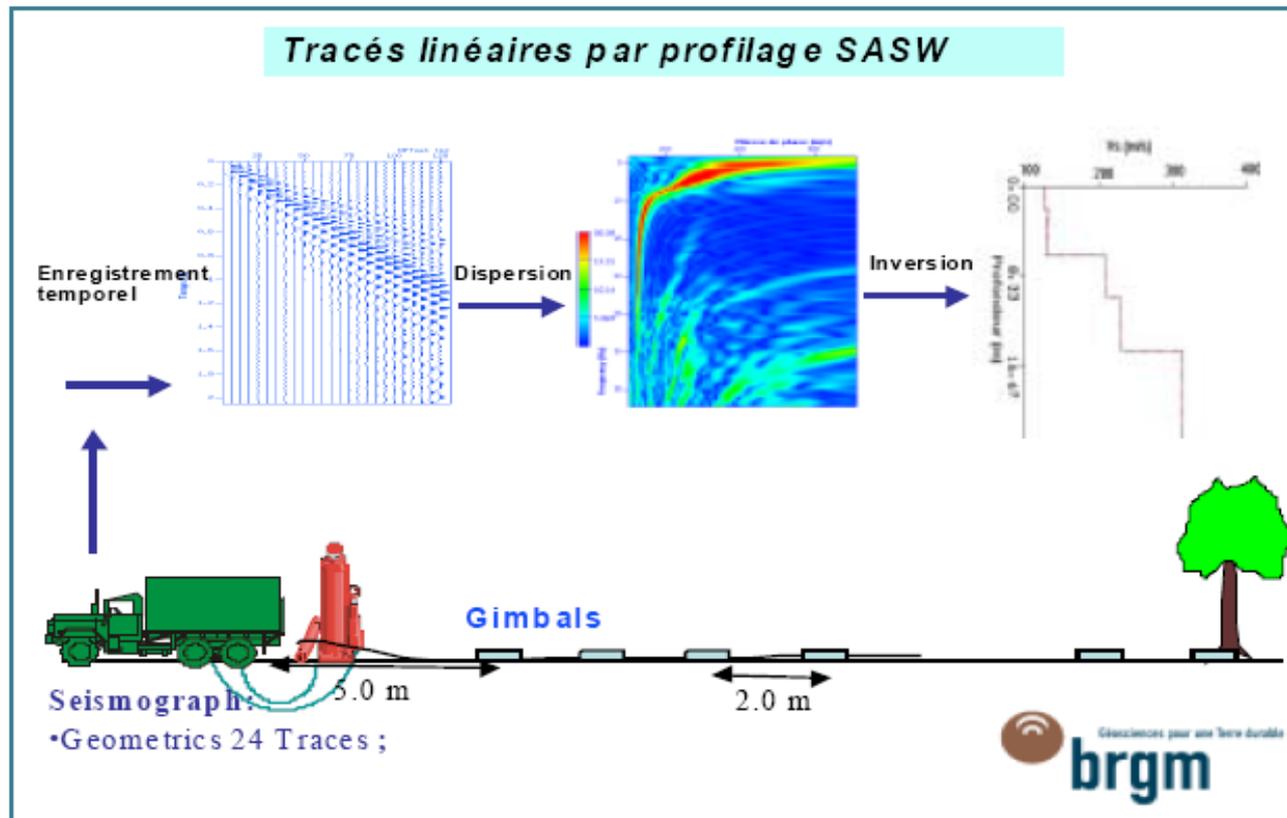
- de 20 à 50% d'écart
- de 4 à 20% d'écart
- moins de 4 % d'écart



# **Tranche 2 et 3: Élaboration d'une carte de susceptibilité de présence de karsts à l'échelle du Val d'Orléans: méthodologies géophysiques à grand rendement**

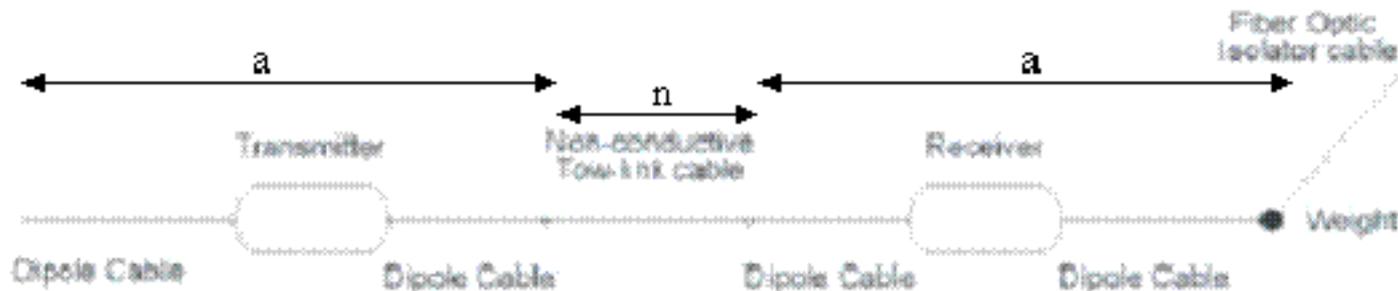
# Principes des méthodes géophysiques

- > La méthode sismique MASW permet de déterminer le champ de vitesse de cisaillement des ondes ( $V_s$ ) 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  $V_s$ , 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.



# Principes des méthodes géophysiques

- > 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 électrique capacitive 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.

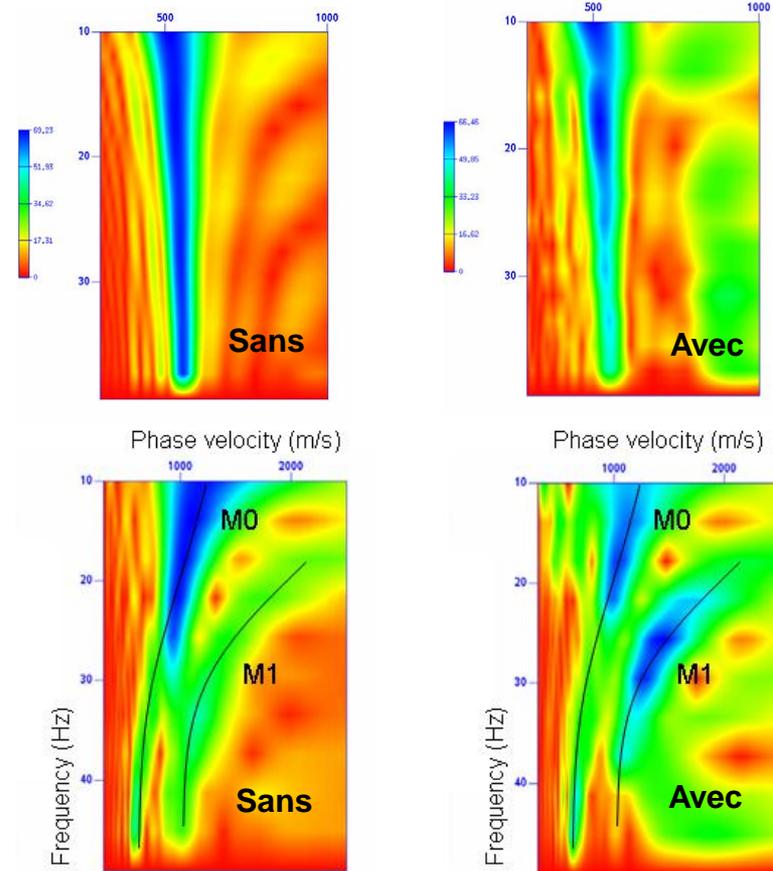
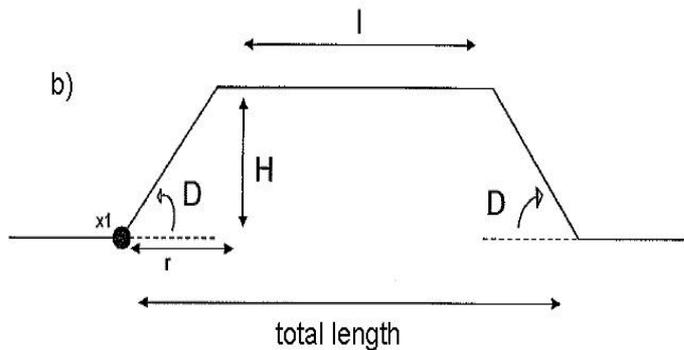


# Effet de la topographie dans la prospection MASW: *Modélisation 3D de propagation d'ondes élastique*

a)



(Photo: BRGM)



# Mise en œuvre (1)

## > MASW:

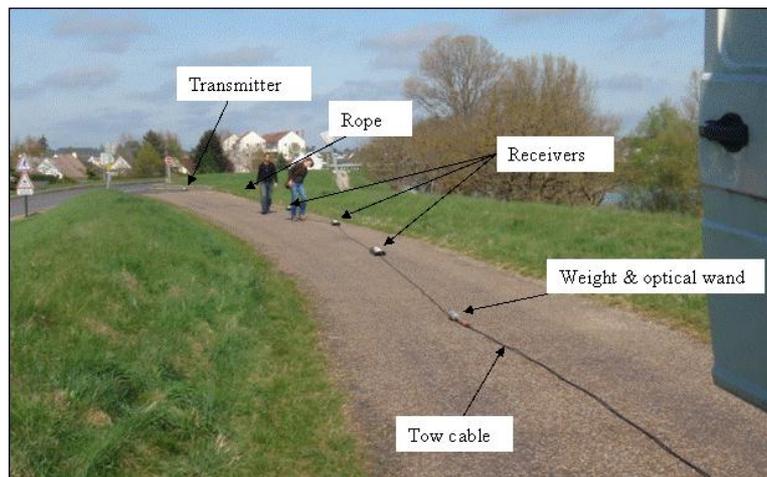
- Centrale d'acquisition Geometrics Geode 24 traces
- 24 géophones ABEM 10 Hz
- Inter-trace 2 m
- Distance entre tir sismique 10 m
- Source électronique GISCO de type chute de poids
- Dispositif tracté par un véhicule 4X4
- Profil géoréférencé en début et fin et projection sur le terrain



(Photo: BRGM)

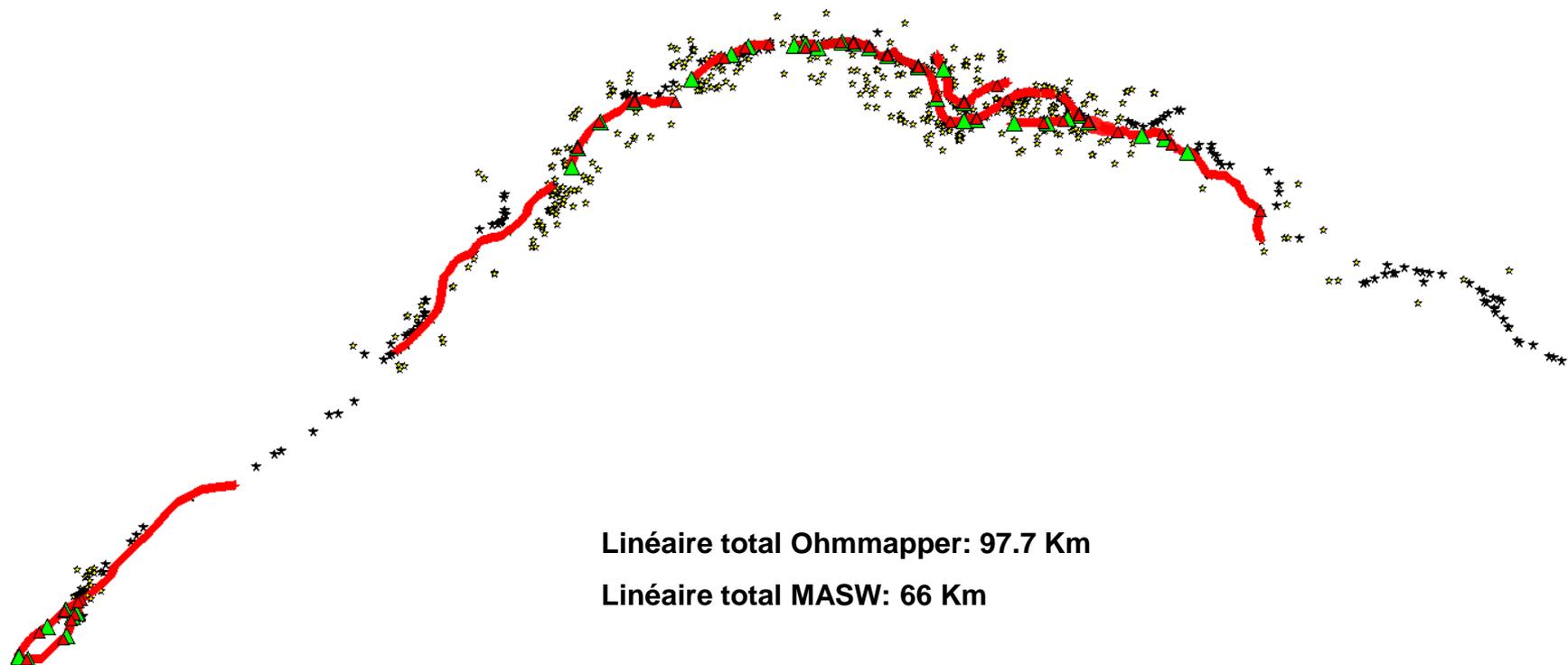
## > Ohmmapper:

- 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)

# Mise en œuvre (2)



Linéaire total Ohmmapper: 97.7 Km

Linéaire total MASW: 66 Km

— Profil électrique

★ Désordre (Karts, doline, fontis, gouffre, ...)

★ Brèche

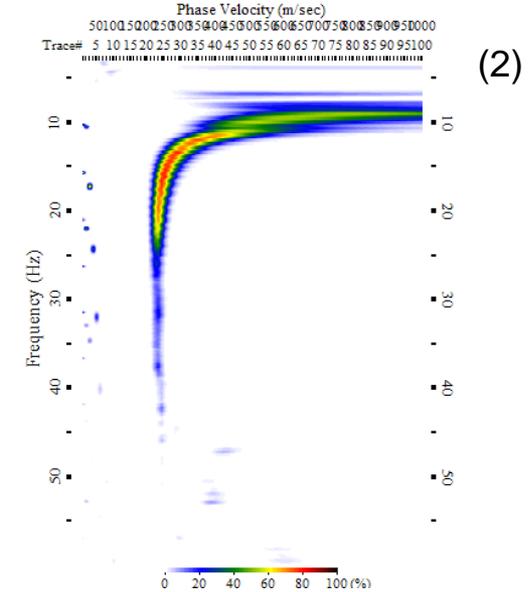
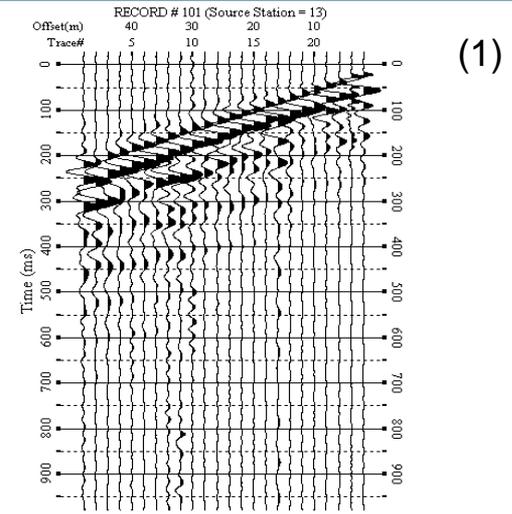
▲ Début coupe sismique

▲ Fin coupe sismique

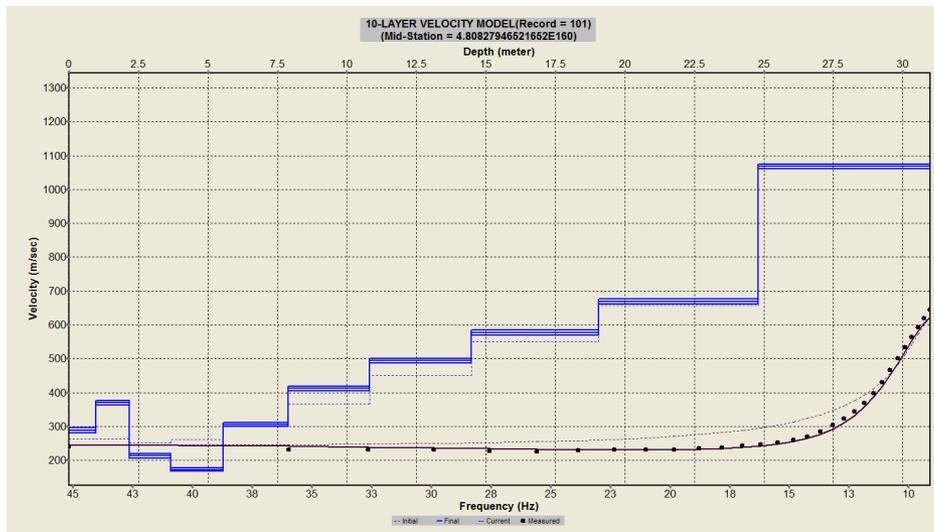


# Traitement (1)

- > **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 cisailment  $V_s(z)$ . 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  $V_s(z)$  le long du tracé pour obtenir un profil 2D de  $V_s(z)$



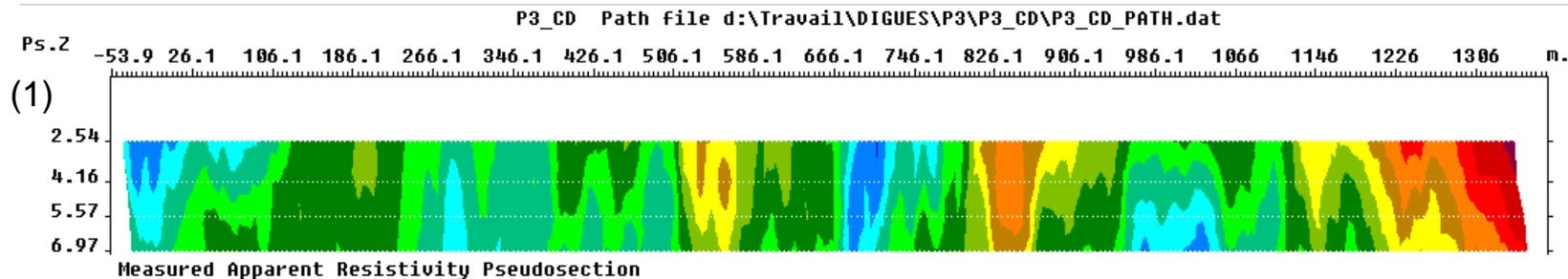
(3)



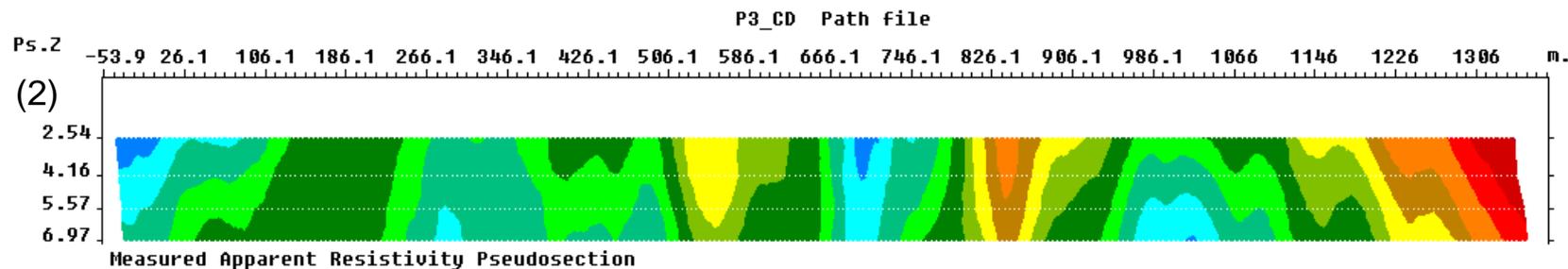
# Traitement (3)

## > Ohmmapper:

- Traitement des données avec et obtention de pseudo coupes de résistivité apparente (1)

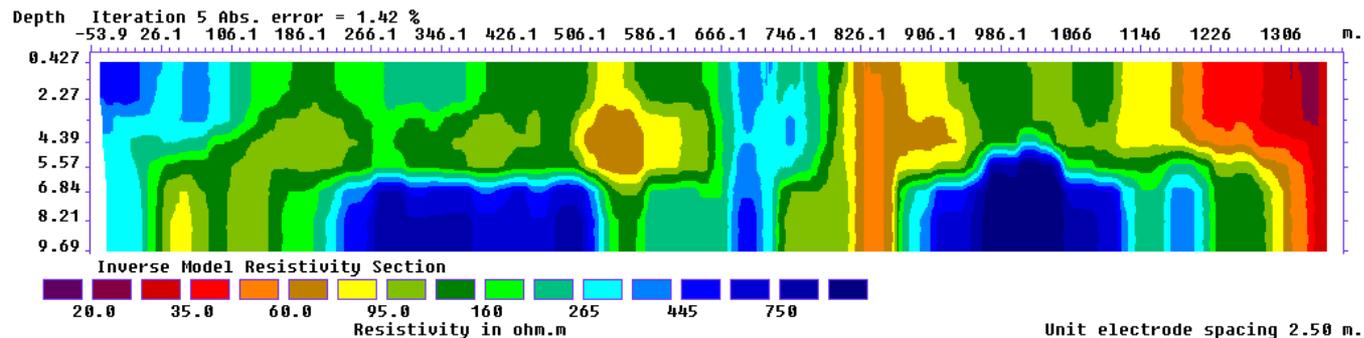
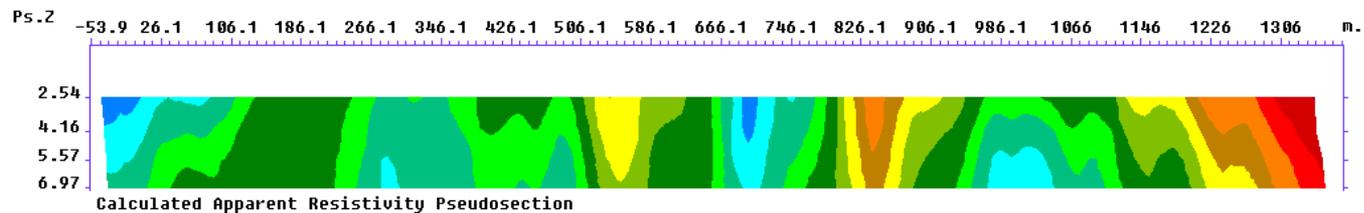
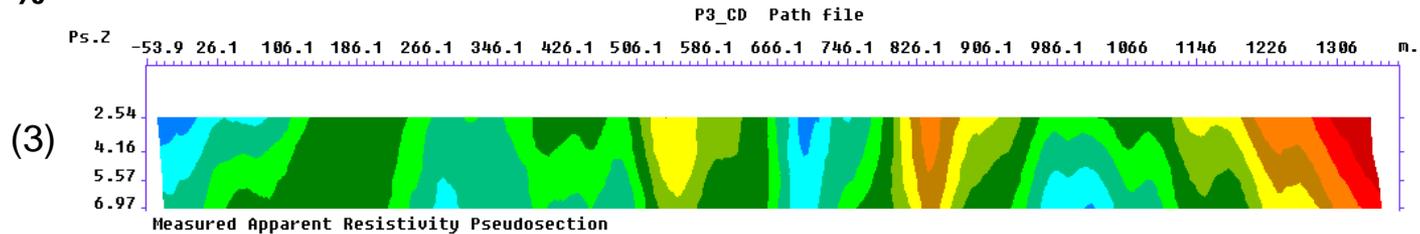


- Correction et filtrage des coupes (2)



# Traitement (4)

- Inversion 2D de la pseudo coupe de résistivité apparente filtrée et obtention de coupes de résistivité vraie tronquées à z=1 et 7 m (3); 1 % < erreur absolue des inversions < 4 %



Unit electrode spacing 2.50 m.  
sciences pour une Terre durable



# Interprétation (1)

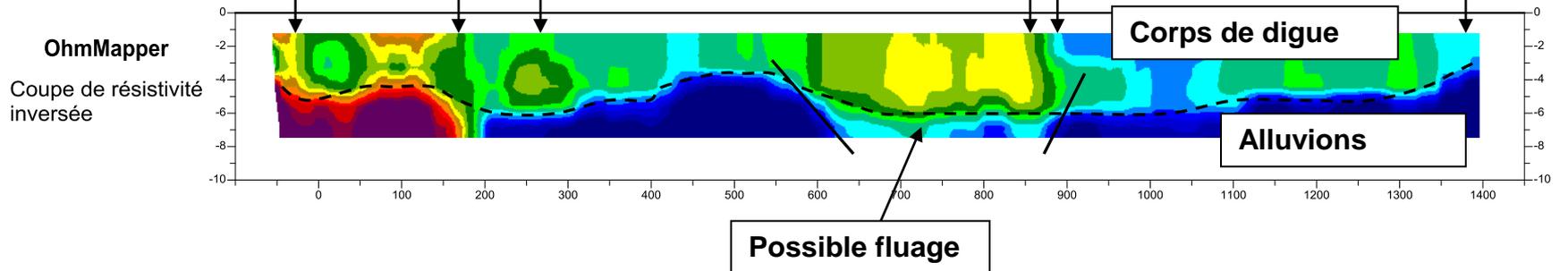
> Ohmmapper:

SR3-SR1-SD32 LR Blois  
0-1.5 m: Sable graveleux  
1.5-9.5 m: Argile marron

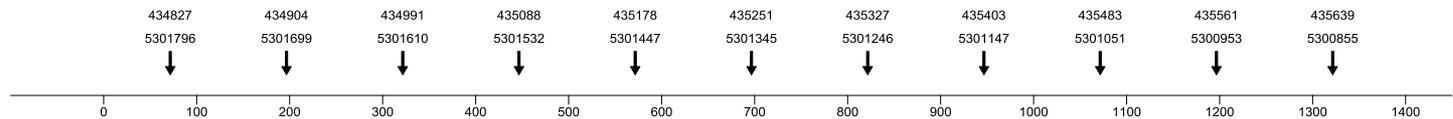
Sondage destructif SD4 LR Blois  
0-1.7 m: Sable graveleux  
1.7-5.6 m: Argile sableuse  
5.6-11.2: Sable graveleux

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



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



Echelle de résistivité en ohm.m



# Interprétation (2): analyse superficielle

| 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 <sup>+</sup>      |                         |                 | -1950/-1670   | 5.5 à 10                | 25-75               | A                      |                            |                | 0                                  |
|        | -1880/-1720    | ?                   | 160-350             | SA s <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup> + SG |                         |                 | -1330/-1280   | 5.5 à 10                | 100-160             | SA a <sup>+</sup>      | 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 <sup>+</sup>      | 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 <sup>+</sup>      | 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 <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup> + SG | fluage vers karst possible |                | 1                                  |
|        | -180/50        | 2.5 à 4             | 125-350             | SA s <sup>+</sup> + SG |                         |                 | -180/50   | 5.5 à 10                | >400                | SG                     |                            |                | 0                                  |
| P2-AB  | -725/-230      | 3 à 4.5             | 125-350             | SA s <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup> + 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 <sup>+</sup>      | fluage vers karst possible |                | 1                                  |
|        | 570/950        | 6                   | 45-100              | A + SA a <sup>+</sup>  |                         |                 | 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              |                                    |

# Interprétation (3)

Sondage pressiométrique SP. 8 LR Blois

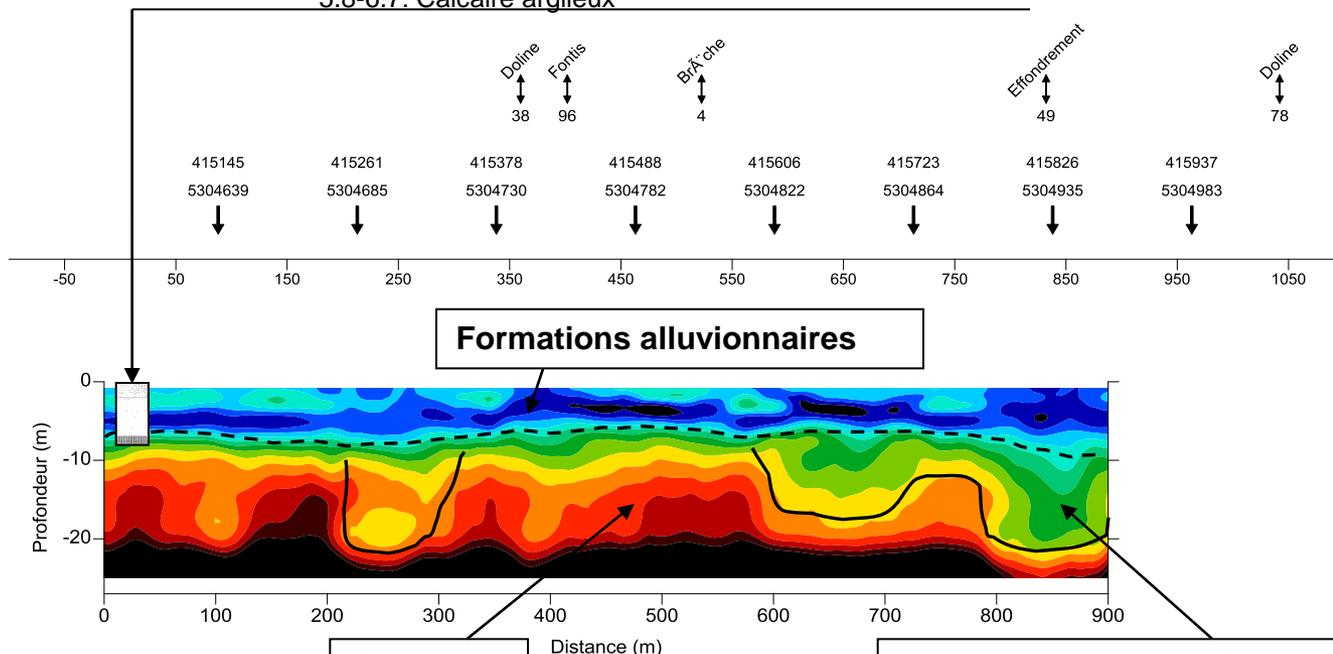
0-1.6 m: Remblai

1.6-5.8 m: Sable fin graveleux

5.8-6.7: Calcaire argileux

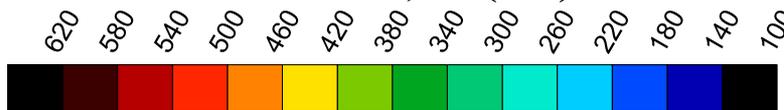
> MASW:  
BD géol

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



MASW  
Coupe de vitesse de  
cisaillement

Vitesse de cisaillement, Vs (m/s)



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 2 BRGM ICSEO 2011

Forage destructif 1 BRGM ICSEO 2011

Forage destructif 3 BRGM ICSEO 2011

0-5 m: Remblai

0-4.6 m: Remblai

0-6.6 m: Remblai

5-13 m: Sable graveleux

4.6-12 m: Sable graveleux

6.6-13.7 m: Sable graveleux

13-40 m: Calcaire décomprimé

12-20 m: Calcaire décomprimé

13.7-20 m: Calcaire décomprimé

20-40 m: Marno-calcaire compact

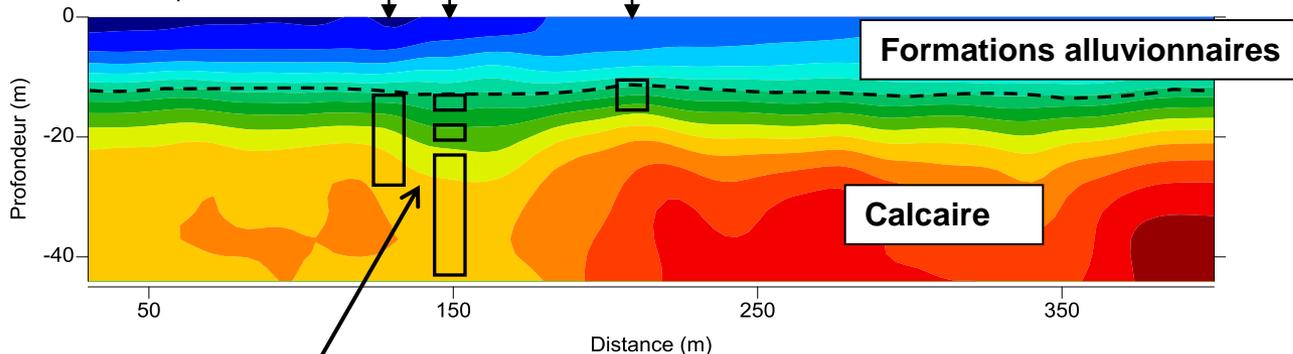
BD géol

20-23 m: Passées très décomprimées ou cavité

23-40 m: Calcaire décomprimé

Effondrement  
49

Vitesse de cisaillement,  $V_s$  (m/s)

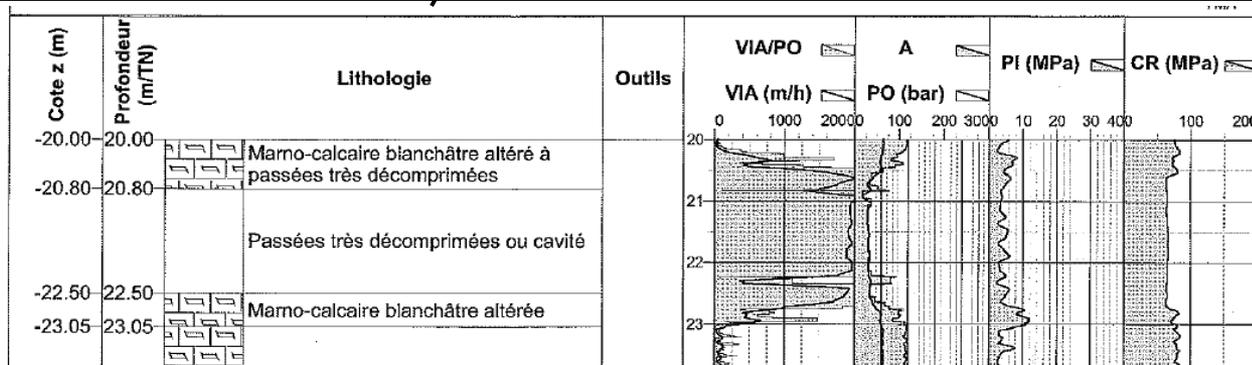


MASW

Coupe de vitesse de cisaillement

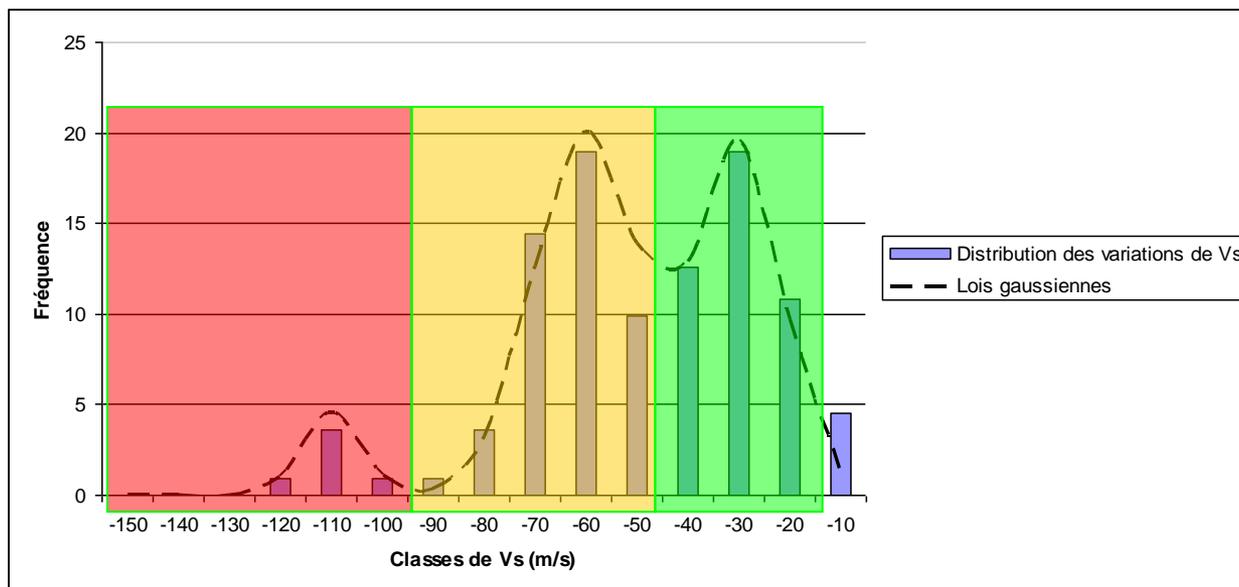
**Zone de faible  $V_s$  ~300-400 m/s = zones altérée, possibles karsts (Debeglia et al., Knödel 1997 Vitesse et densité des milieux, Geoexpert)**

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



# Interprétation (5): analyse 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        |

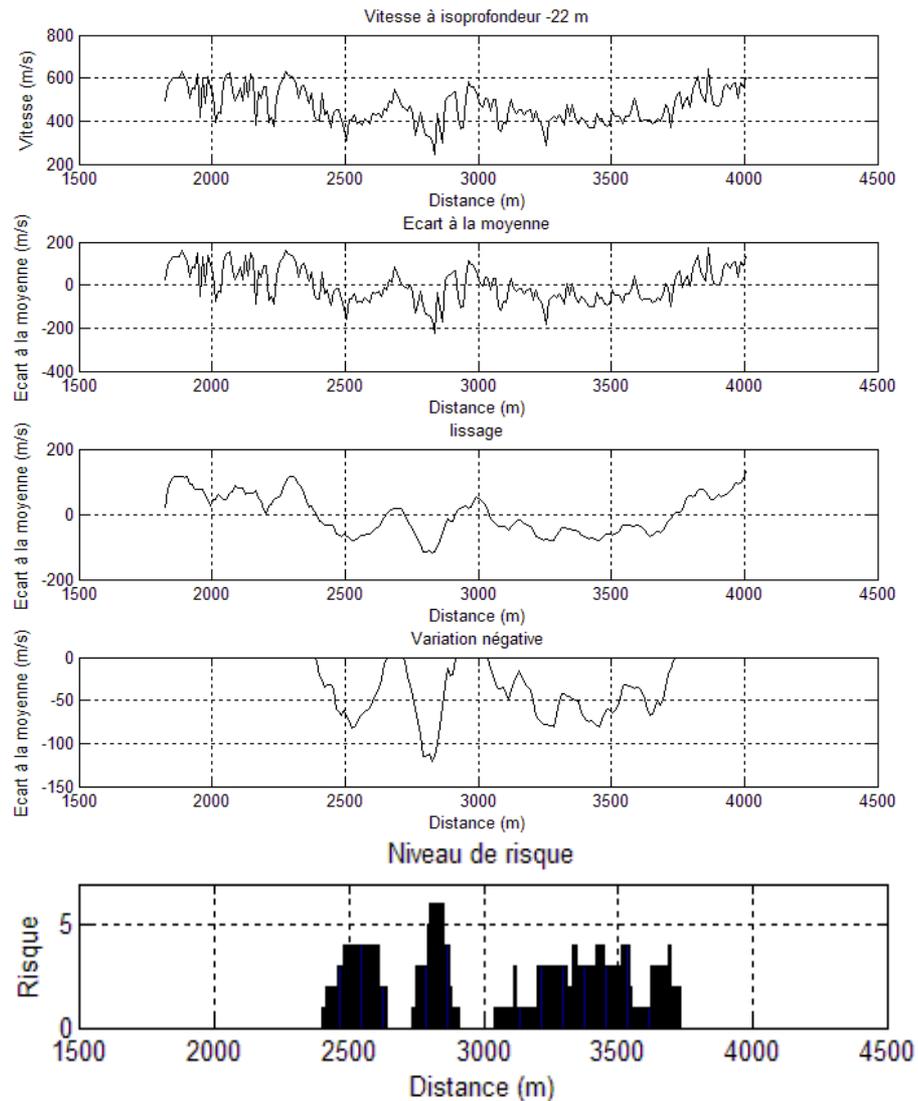
- Superposition de l'indice de susceptibilité karstique issu de l'interprétation Ohmmapper et implémentation du risque karstique associé (niveau +1 si cohérence avec risque sismique)

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

# Interprétation (5)

## P1-OP Jargeau -> Sandillon

### > Exemples

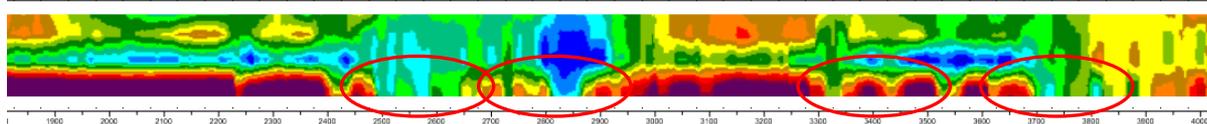


# Interprétation (6)

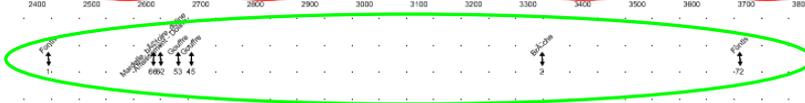
## P1-OP Jargeau -> Sandillon

OhmMapper

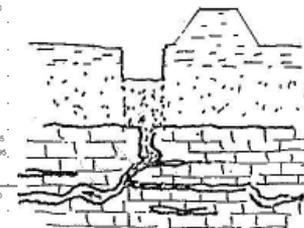
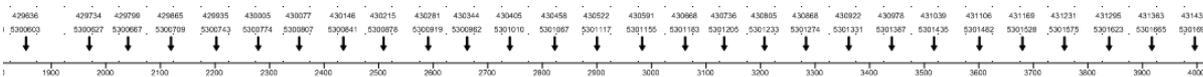
Coupe de-résistivité inversée



BD géol

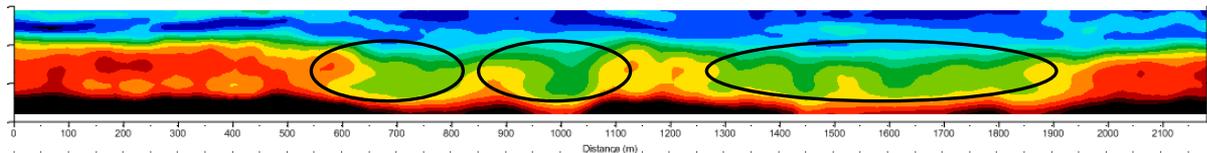


Coordonnées WGS84-UTM 31 en fonction de la distance le long du profil (en m)

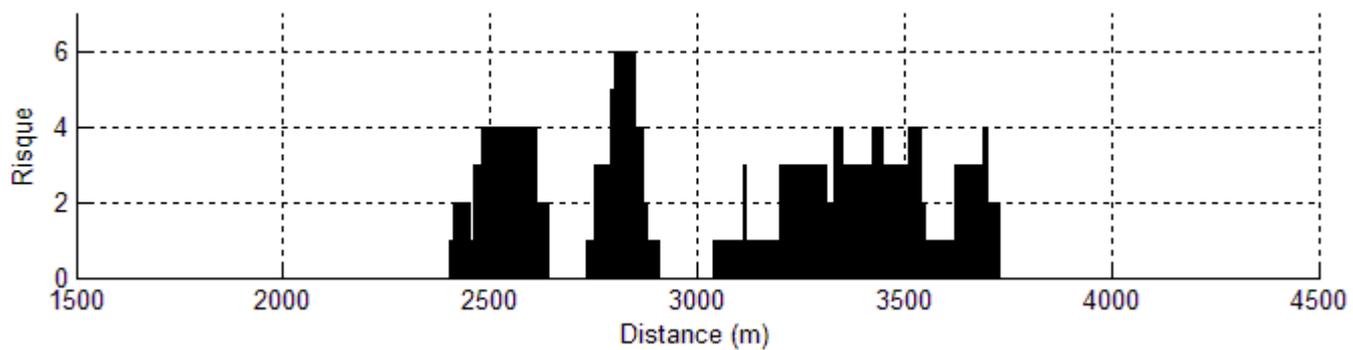


MASW

Coupe de vitesse de cisaillement

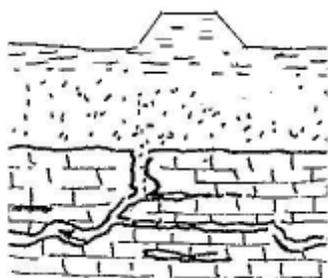


Niveau de risque

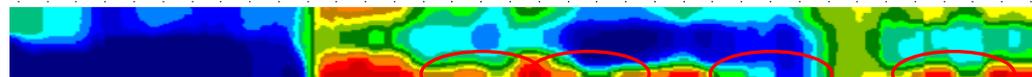


# Interprétation (7)

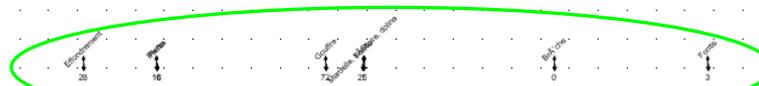
## P1-GH Sandillon Ouest



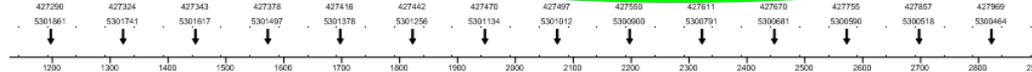
OhmMapper  
Coupe de résistivité  
inversée



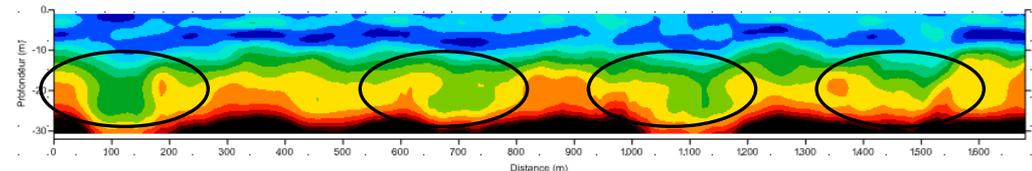
BD géol



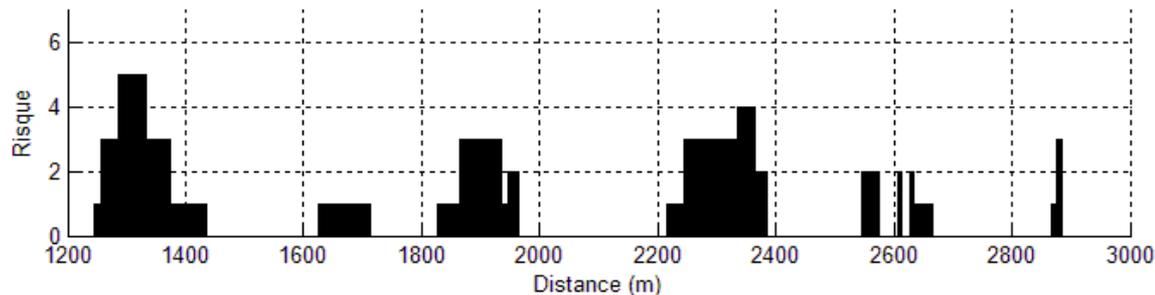
Coordonnées  
WGS84-UTM 31  
en fonction de la  
distance le long  
du profil (en m)



MASW  
Coupe de vitesse de  
cisaillement



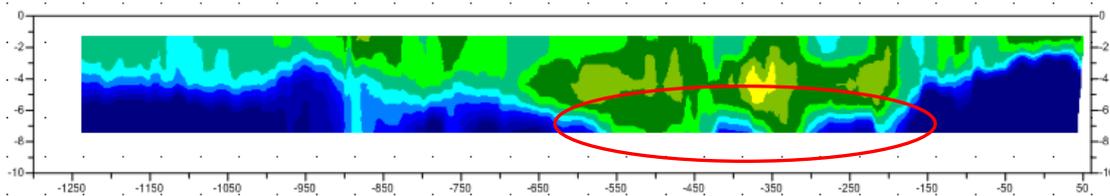
Niveau de risque



# Interprétation (10)

## P2-CD Jargeau Digue intérieure Est

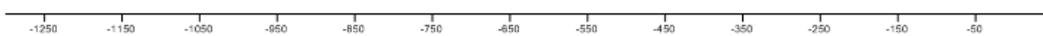
OhmMapper  
Coupe de résistivité  
inversée



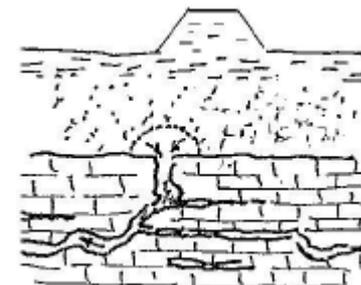
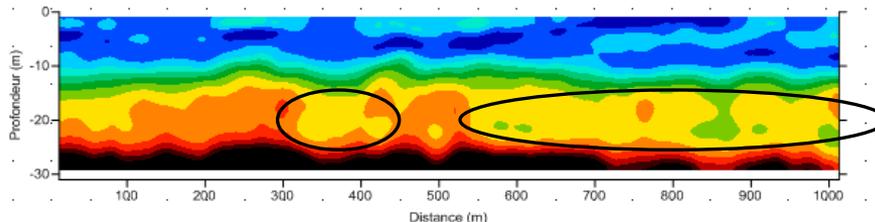
BD géol

433774 433837 433899 433961 434023 434086 434148 434211 434273 434335 434397 434460 434521 434583 434644 434704 434764 434822 434881 434940  
5300317 5300320 5300325 5300330 5300334 5300338 5300343 5300346 5300351 5300356 5300360 5300366 5300376 5300387 5300402 5300419 5300436 5300457 5300479 5300499

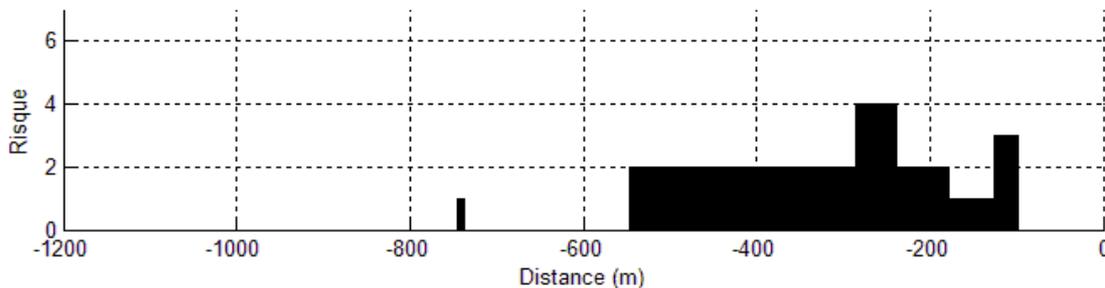
Coordonnées  
WGS84-UTM 31,  
en fonction de la  
distance le long  
du profil (en m)



MASW  
Coupe de vitesse de  
cisaillement



Niveau de risque



# Interprétation (11)

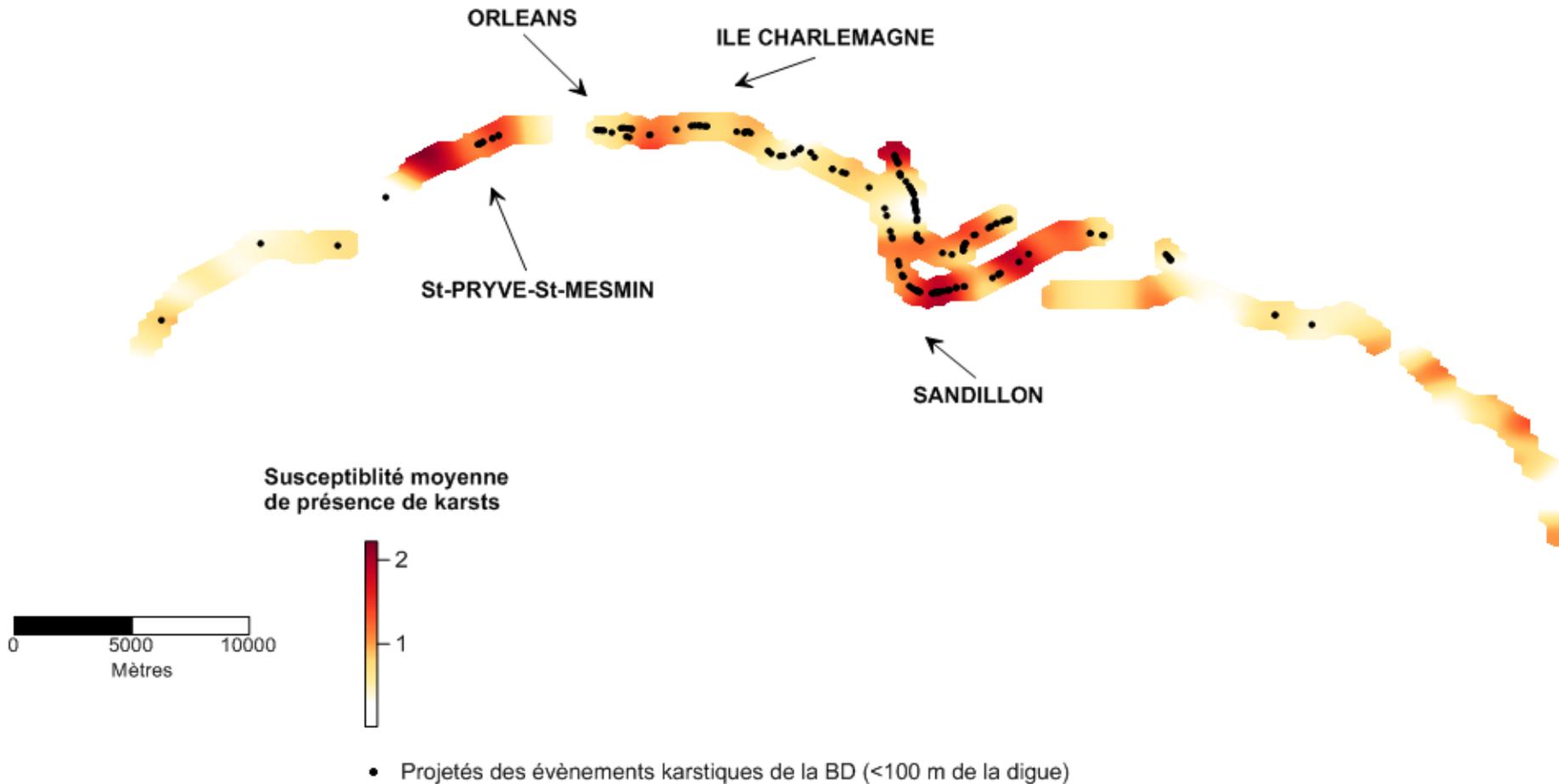


**Effondrement d'origine karstique à St-Pryvé-St-Mesmin (45) 22 mai 2010**



(Photo: BRGM)

# Interprétation (12)



## Interprétation (13)

- > 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.

# Conclusions

- **L'indice de susceptibilité karstique mis au point pour permettre une interprétation adaptée à l'objectif du projet, la détection des karsts potentiellement présents sous les digues, s'est d'abord appuyé sur la méthode MASW.**
- **La comparaison des vitesses de cisaillement le long des profils, à une profondeur de 15m sous le toit interprété des calcaires, a été choisie comme élément privilégié de notre méthodologie.**
- **Cet indice est complété par les résultats obtenus dans les digues elles-mêmes par la méthode électrique, les anomalies de ce type pouvant indiquer des zones de perturbations dans les matériaux constituant les digues.**
- **L'évaluation de cet indice a été réalisée sur l'ensemble des longueurs de profils communs aux deux méthodes d'investigations.**

- **Ce nouvel indice de susceptibilité à l'énorme avantage, sur les techniques principalement basées sur les informations géologiques, tels que nous les avons présentées dans la tranche 1 de ce projet, d'être beaucoup plus précis puisqu'évalué au pas de 10m sur les profils.**
- **Les valeurs de cet indice de susceptibilité ont été comparées avec les informations contenues dans la base de données des cavités et les résultats obtenus semblent particulièrement intéressants.**
- **Ce nouvel indice de susceptibilité est pour l'instant uniquement basé sur des méthodes géophysiques et donc indirectes. Il doit donc être confirmé par l'utilisation de méthodes d'observation directes comme les sondages par exemple.**
- **Cette dernière étape a permis d'affiner la carte de susceptibilité de la tranche 1 sur le secteur le plus problématique et de délimiter les zones sur lesquelles des actions pourront être menées : analyse géotechnique, surveillance, suivi de l'état des digues, sécurisation, confortement.**



(Photo: BRGM)

# Merci de votre attention



(Photo: BRGM)



(Photo: BRGM)